ЦЕНТРАЛЬНОЕ БЮРО ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
НИИ ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ

*А. Я. Бергер*

# ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ УСИЛИТЕЛИ (ЭМУ)

Москва [illegible]

ЦЕНТРАЛЬНОЕ БЮРО ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
НИИ ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ

*А. Я. Бергер*



# ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ УСИЛИТЕЛИ (ЭМУ)

Москва 1959



## ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящей работе автор ставит перед собою цель — дать краткое и систематическое изложение основ теории и принципов работы всех известных видов электромашинных усилителей (ЭМУ).

Вопросы проектирования (расчета и конструкции), исследования и применения ЭМУ рассматриваются кратко, в объеме, необходимом только для понимания теории и принципов работы ЭМУ.

Данный труд должен облегчить молодому инженеру, студенту, аспиранту ознакомление со всеми видами ЭМУ и может служить для дальнейшего более углубленного изучения того или иного конкретного вопроса применительно к данному виду ЭМУ.

Автор выражает благодарность рецензенту тов. Фиалкову М. Н., а также редактору тов. Браммеру Ю. А.

## ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

МПТ — машина постоянного тока;
ГПТ — генератор постоянного тока;
ДПТ — двигатель постоянного тока;
ППТ — преобразователь постоянного тока;
О.В. — обмотка возбуждения;
О.У. — обмотка управления;
О.О.С. — обмотка обратной связи;
О.С. — обмотка самовозбуждения сериесная;
О.С.Ш. — обмотка самовозбуждения шунтовая;
К.О. — компенсационная обмотка;
Д.П. — дополнительные полюсы;
О.Д.П. — обмотка дополнительных полюсов;
Р.Я. — реакция якоря;
С.О. — сериесная обмотка;
Ш.О. — шунтовая обмотка;
ЭМУ — электромашинный усилитель;
ЭМР — электромашнннный регулятор;
С.М. — синхронная машина;
С.Г. — синхронный генератор;
С.Д. — синхронный двигатель;
С.К. — снихронный компенсатор;
В.Г. — возбудитель;
А.Д. — асинхронный двигатель;
Т.Г. — турбогенератор;
ТаГ — тахогенератор;
ГГ — гидрогенератор;
Т.Н. — трансформатор напряжения;
н. с.— намагничивающая сила;
О.П. — одноякорный преобразователь.

# *Глава I*

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

### § 1. Генераторы постоянного тока специального назначения

Кроме обычных генераторов постоянного тока нормального исполнения, в различных областях народного хозяйства (для освещения поездов, целей сварки, оборудования самолетов, возбуждения крупных синхронных машин, для следящих систем и т. д.) используются генераторы со специфическими характеристиками.

Их можно разбить на две большие группы:

А. Генераторы с продольным возбуждением.

Б. Генераторы с поперечным возбуждением.

**К генераторам с продольным возбуждением принадлежат:**

а) генераторы с комбинированным продольным возбуждением;

б) генераторы с двойной полюсной системой;

в) генераторы с возбуждением от третьей щетки;

г) электромашинные усилители (ЭМУ) продольного поля.

**К генераторам с поперечным возбуждением принадлежат:**

а) сварочные генераторы;

б) генераторы для освещения поездов;

в) ЭМУ поперечного поля.

О генераторах специального назначения говорится обычно в общем курсе электромашин [2, 12].

В настоящей работе рассматриваются электромашинные усилители всех видов, причем об амплидине, получившем у нас наибольшее применение, говорится более подробно.

В качестве примеров применения ЭМУ будет приводиться либо схема Леонарда (схема Г-Д) с регулированием того или иного параметра (ток, напряжение, мощность, число оборотов двигателя и т. д.), либо схемы возбуждения крупных синхронных генераторов.

В обычной схеме Леонарда без специальных мероприятий можно получить повышение скорости двигателя в 4 раза и снижение его скорости от номинального в 10 раз, т. е. получить диапазон регулирования 1 : 40.

Для получения бо́льшего диапазона регулирования (1 : 100 и выше) следует применять схемы со специальными возбудителями в виде тех или иных ЭМУ.

## § 2. Определение понятия «усилитель». Классификация ЭМУ. Применения

Устройства, предназначенные для усиления мощности, называют усилителями. Усиление мощности входного сигнала в таких устройствах происходит за счет потребления энергии от источников питания.

Усилители могут быть магнитные (МУ), электронно-ионные и электромашинные (ЭМУ). Настоящая работа посвящена только последнему виду усилителей.

Электромашинные усилители (ЭМУ) разделяются:

а) по числу ступеней усиления—одно-, двух- и трехступенчатые. Теоретически возможно и большее число ступеней, однако практически в этом нет необходимости;

б) по характеру создания магнитного поля для второй ступени, которое может быть продольным или поперечным. В последнем случае дополнительные щетки по поперечной оси замыкаются накоротко; такие усилители называются ЭМУ поперечного поля.

В поперечной цепи этих ЭМУ индуктируется э.д.с. от продольного поля обмотки возбуждения, питаемой от постороннего источника. Ток поперечной цепи создает поток, обусловливающий э.д.с. в следующей продольной (второй) цепи усиления, которая является выходной в случае двухступенчатого усилителя.

Могут быть ЭМУ и смешанного типа, в них имеют место как продольное, так и поперечное возбуждение для второй ступени. Поэтому по характеру возбуждения ЭМУ можно разбить на три основные группы:

А. ЭМУ поперечного поля, к которым относятся:

1. Амплидин.
2. Метадин.
3. Магникон.

Б. ЭМУ продольного поля, к которым относятся:

1. Рототрол одноступенчатый.
2. Регулекс.
3. Магнавольт двухступенчатый.
4. Рапидин.

В. ЭМУ продольно-поперечного поля, к которым относятся:

1. Магнавольт трехступенчатый.
2. Рототрол двух- и трехступенчатый.
3. Автодин.

Преимущественное использование в СССР амплидина привело к тому, что в нашей научной литературе и в каталогах электропромышленности именно ему присвоено название «электромашинный усилитель».

Слово «амплидин» — составляется первыми половинами слов — amplifier dynamo, что означает усилительная динамомашина.

В дальнейшем мы сохраним название ЭМУ как общее родовое понятие для электромашинных усилителей.

Усилитель дает возможность малыми мощностями на входе регулировать в желательном направлении большие мощности на выходе. Выходная мощность усилителя вырабатывается за счет мощности двигателя, приводящего ЭМУ во вращение.

Некоторые примеры использования ЭМУ [5]:

1. **Генератор** в схеме Леонарда, если мощность двигателя не выше нескольких киловатт.

2. **Возбудитель** в схеме Леонарда при мощности двигателя не выше нескольких сот киловатт.

3. **Подвозбудитель** генератора в схеме Леонарда, если мощность двигателя порядка тысяч киловатт.

4. **Возбудитель** С.Д. с быстро меняющейся нагрузкой или С.Г. при автоматическом регулировании напряжения при мощности синхронных машин не выше двух-трех тысяч киловатт.

5. **Подвозбудитель** в системе возбуждения С.Г. любой мощности.

6. **Бустер** в главной цепи генератора схемы Леонарда или возбудитель этого бустера.

7. **Промежуточный усилитель** управляющего сигнала в схемах автоматики и т. д.

Усилители всех родов (электронно-ионные, магнитные и электромашинные) позволили значительно упростить схемы электропривода и перейти от прерывистого регулирования посредством большого количества контакторов и другой аппаратуры к непрерывному регулированию, легче поддающемуся автоматизации.

Так, например, при замене старой системы управления блюмингом (релейно-контакторной) новой (с амплидином) схема значительно упростилась.

| Элементы схемы | Количество аппаратов, шт. | |
|---|---|---|
| | старая схема | новая с амплидином |
| Контакторы | 26 | — |
| Регуляторы | 2 | — |
| Реле | 30 | 12 |
| Итого | 58 | 12 |

Подробно о достоинствах применения ЭМУ с точки зрения автоматизации производственных процессов см. литературу в конце работы.

Система возбуждения крупного ГПТ или С.Г. содержит три элемента:

1) машину постоянного тока для возбуждения — возбудитель;
2) регулятор напряжения (со всеми его элементами);
3) приспособление для регулирования нагрузки генератора.

В настоящей работе рассматривается только первый элемент — возбудитель, который часто является тем или иным видом ЭМУ. При этом ЭМУ используется или как основной возбудитель, или как подвозбудитель, либо как тот и другой.

Обычный генератор постоянного тока потребляет для возбуждения мощность порядка 1—5% от номинальной. ЭМУ возбуждается при мощностях в 50—100 раз меньших. При этом выходная мощность превышает мощность возбуждения для ЭМУ поперечного поля в 2000—10 000 раз, а в ЭМУ продольного поля — в 50— 100 тысяч раз.

На выходную мощность от нескольких сот ватт до нескольких десятков киловатт строятся ЭМУ поперечного поля, а на мощности до сотен киловатт — ЭМУ продольного поля (рототролы).

# *Глава II*

## ЭМУ ПОПЕРЕЧНОГО ПОЛЯ (АМПЛИДИН, МАГНИКОН, МЕТАДИН)

### § 1. Устройство и принцип действия амплидина

Якорь амплидина не отличается от якоря обычного генератора постоянного тока, а магнитная система его выполняется шихтованной с целью уменьшения демпфирующего действия вихревых токов, замедляющего переходные процессы в машине. Штампованный стальной лист статора амплидина изображен на рис. 1.

В большие пазы статора укладываются обмотки управления — две, три, четыре в зависимости от назначения амплидина. В малые пазы укладываются обмотки дополнительных полюсов (Д.П.) и компенсационная обмотка (К.О.). Дополнительные полюсы располагаются обычно только по продольной оси.

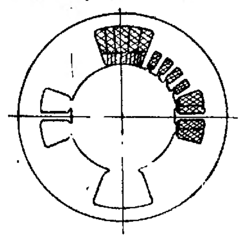


Рис. 1. Штампованный стальной лист и обмотка статора амплидина

Схема амплидина приведена на рис. 2. Якорь имеет две системы щеток. Пара щеток на поперечной оси $qq$ замыкается накоротко, выходные щетки $dd$ по продольной оси служат для питания нагрузки. В цепь этих щеток включается компенсационная обмотка, шунтируемая сопротивлением $r_ш$.

Независимая обмотка управления *1* питается от напряжения $U_1$, и возбуждает поток $\Phi_1$. Последний создает э.д.с. $e_2$ и ток $i_2$ в цепи к.з. щеток $qq$, создающий поперечное поле якоря $\Phi_q = \Phi_2$, направленное по оси этих щеток.

При вращении якоря машины проводники его пересекают поперечное поле и в них возникает э.д.с., которая через щетки продольной оси $dd$ проводит ток по нагрузке. Однако выходной ток создает свой продольный поток $\Phi_d$, значительно более мощный, чем поток

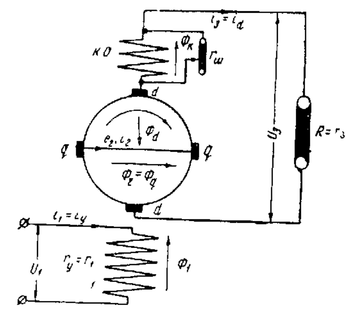



Рис. 2. Принципиальная схема амплидина

обмотки управления $\Phi_1$, и действующий против него. Для уничтожения продольного потока якоря применяется обязательная в амплидине компенсационная обмотка (К.О.), намагничивающая сила (н.с.) которой направлена против продольной н.с. якоря. Так как обычно $\Phi_K > \Phi_d$, то для получения точной компенсации К.О. снабжается шунтом $r_ш$. Неточность в компенсации может привести к резкой зависимости выходного напряжения $U_3$ амплидина от нагрузки, что обычно нежелательно.

Таким образом, если обычная МПТ является усилителем с одной ступенью усиления (от обмотки возбуждения к обмотке якоря), то амплидин представляет собой двухступенчатый усилитель в одной машине — от обмотки управления к обмотке якоря по поперечной оси и от последней к той же обмотке якоря по продольной оси.

В обычных МПТ борются с поперечной реакцией якоря, устанавливая на поперечной оси машины добавочные полюсы с таким расчетом, чтобы они не только создавали нужную коммутирующую э.д.с. в к.з. секции под щеткой, но и компенсировали поперечную реакцию якоря. В больших машинах в поперечной оси применяют, кроме этого, еще К.О.

В машинах поперечного поля, наоборот, всемерно увеличивают поперечную реакцию якоря, а компенсационную обмотку применяют для уничтожения продольной реакции якоря, которая иначе может компенсировать действие слабого поля основной (входной, управляющей) обмотки возбуждения; добавочные полюсы ставят обычно только в продольной оси ЭМУ, в поперечной оси Д.П. мало эффективны [23].

Чаще всего амплидин приводится в движение асинхронным к.з двигателем на общем валу. В малых амплидинах приводной А.Д. и амплидин имеют общую станину (см. каталог МЭП № 1611).

В зависимости от назначения амплидина он имеет, кроме основной обмотки управления, еще одну, две, три обмотки обратной связи для регулирования того или иного параметра выходной нагрузочной цепи.

## § 2. Коэффициенты усиления и постоянные времени цепей амплидина

Работа амплидина, как и всякого ЭМУ, характеризуется коэффициентом усиления, постоянными времени его цепей и устойчивостью работы.

На вопросе устойчивости мы остановимся далее при рассмотрении переходных режимов работы амплидина.

Для эффективности и быстродействия коэффициент усиления его желательно иметь высоким, а постоянные времени — малыми. Однако, как будет показано ниже, между коэффициентами усиления и постоянными времени цепей ЭМУ существует прямая пропорциональность; улучшение одного из двух рассматриваемых показателей происходит за счет ухудшения другого. Рассмотрим это подробнее.

а) Коэффициент усиления по мощности

Усиление мощности происходит в первой ступени от $P_1 = U_1 I_1$ до $P_2 = E_2 I_2$, а во второй ступени от $P_2$ до $P_3 = U_3 I_3$.

Таким образом, коэффициент усиления амплидина

$$k_y = \frac{P_3}{P_1} = \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{P_3}{P_2} = k_{y1} \cdot k_{y2}.$$

В большинстве случаев коэффициент усиления первой ступени значительно меньше, чем второй (например, $k_{y1} \cong 40$, $k_{y2} = 200$ и $k_y = 40 \cdot 200 = 8000$). Обычно $k_y < 10\,000$, хотя в специальных случаях может доходить даже до 100 000.

В зависимости от параметров коэффициент усиления амплидина без учета реакции коммутационных токов равен [30в]

$$k_y = \frac{4 k_{y\,макс}}{\frac{R}{r_d} + \frac{r_d}{R} + 2};$$

$$k_{y\,макс} \cong 1{,}25 \left( \frac{p\,\alpha_q\,\alpha_d}{r_q\,\delta_q\,\delta_d} \right)^2 \cdot (l\,\tau)^4 \cdot \frac{w_a \cdot w_y}{r_y \cdot r_d} \cdot n^4 \cdot 10^{-6},$$

где $p$ — число пар полюсов;

$\alpha_d$, $\alpha_q$ — коэффициенты магнитного перекрытия по продольной и поперечной осям;

$\tau$ — полюсное деление;

$l$ — длина якоря;

$w_a = \frac{N}{4a}$ — число витков якоря;

$N$ — число проводников якоря;

$2a$ — число параллельных ветвей в обмотке якоря;

$w_1 = w_y$ — число витков управляющей обмотки;

$\delta_q$, $\delta_d$ — воздушные зазоры по поперечной и продольной осям (с учетом коэффициента Картера);

$$r_q = r_a + r_b;$$

$$r_d = r_a + r_b + r_к + r_д;$$

$r_a$ — сопротивление обмотки якоря;

$r_b$ — сопротивление переходного контакта щеток;

$r_к$ — сопротивление компенсационной обмотки;
$r_д$ — сопротивление обмотки добавочных полюсов;
$R$ — сопротивление нагрузки.

Из формулы следует, что для повышения коэффициента усиления надо увеличивать размеры ЭМУ ($l$ и $\tau$), уменьшать воздушный зазор $\delta$, увеличивать число витков якоря $w_a$ и скорость его вращения.

Величина воздушного зазора МПТ определяется обычно по формуле

$$\delta = k \cdot \frac{\tau \cdot AS}{B_\delta},$$

где для обычных МПТ коэффициент $k = 0{,}2 \div 0{,}33$ (в зависимости от размеров МПТ и наличия К.О.), а в ЭМУ поперечного поля $k = 0{,}1$.

Если учесть коммутационную Р.Я., то коэффициент усиления амплидина уменьшится (см. § 3).

На рассмотрении коэффициентов усиления ЭМУ в переходных режимах или при питании ЭМУ переменным током низкой частоты мы останавливаться не будем; об этом см. [26].

## б) Постоянные времени

Требование максимального коэффициента усиления ЭМУ находится в противоречии с требованием наибольшего быстродействия (наименьшей инерционности), обусловленного наименьшими постоянными времени его цепей.

Постоянная времени обмотки управления

$$T_1 = T_y = \frac{L_1}{r_1} = \frac{L_y}{r_y}.$$

Постоянная времени поперечной цепи якоря

$$T_2 = T_q = \frac{L_2}{r_2} = \frac{L_q}{r_q}.$$

Постоянная времени продольной цепи якоря

$$T_3 = T_d = \frac{L_d}{r_d} = \frac{L_3}{r_3}.$$

Можно показать [30 в], что

$$k_{y\,макс} \equiv \left(\frac{w_a^2}{r_y}\right)^2 \cdot \frac{w_a^2}{r_d} \cdot \frac{w_y^2}{r_y},$$

т. е., что

$$k_{y\,макс} \equiv T_y \cdot T_q^2 \cdot T_d.$$

Таким образом при увеличении $k_у$ увеличиваются и постояниые времеин, т. е. увеличение $k_у$ приводит к уменьшению его быстро действня (отзывчивости).

## § 3. Реакция коммутациоииых токов амплидина

Коммутация токов поперечиой оси обычио бывает замедлеииой. Вследствие отсутствня добавочных полюсов по этой оси, реакция коммутационных токов может достигнуть величины, достаточиой для заметного ослабления поля управления.

Реакция коммутационных токов должиа быть учтена при изучении переходных режимов ЭМУ, при расчете и иаладке его.

Реакция коммутациоиных токов к.з. витков по поперечиой оси ослабляет продольное поле амплидина и уменьшает коэффициеит усилеиия, и для получеиия заданного коэффициента усиления приходится увеличнвать МДС обмоткн управления, следовательно, и размеры усилителя.

Поле, создаваемое компенсационной обмоткой, должно скомпенсировать ие только продольное поле ЭМУ, создаваемое выходным током, но и размагничивающую составляющую от реакции коммутационных токов по поперечной оси, направлеиной также продольно.

Результатирующий поток по продольной оси равен

$$\Phi_d = \Phi_1 + (\Phi_к - \Phi_{ad} \quad \Phi_{к.\,р.\,я}),$$

где $\Phi_1$ — поток от токов в О.У;

$\Phi_к$ поток от токов в К.О;

$\Phi_{ad}$ - поток от токов выходного тока;

$\Phi_{к.\,р.\,я}$ — поток в к.з. витках по поперечной оси.

Расчет размагничивающих ампервитков коммутационной Р.Я. $AW_{к.\,р.\,я.}$ для амплидина приведен в [23 а] и [30 б].

В окончательном виде

$$AW_{к.\,р.\,я.} = 0{,}52 \sqrt[3]{\frac{l\,b_{в}}{R_{в}^2 D_к}} \frac{w_к^{\frac{4}{3}} \quad w_a \tau \beta}{\delta} \; n^{\frac{2}{3}} \; i_2 \cdot 10^{-8},$$

где $b_в$ - ширина щеткн, *см*;

$D_к$ диаметр коллектора, *см*;

$w_к$ — число витков одной секции (на одно коллекторное деление);

$\beta$ — число секций, замкнутых щеткой накоротко;

$l$ — длина активного железа якоря, *см*;

$R_в$ — полное сопротивлеиие щеточного контакта, *ом*;

$n$ — число оборотов в минуту;

$\tau$ — полюсное деление, *см*;

$w_a$ — эффективное число внтков обмотки якоря, т. е. на одну параллельную ветвь

$$w_a = \frac{1}{2} \cdot \frac{N}{2a} = \frac{N}{4a};$$

$N$ — число проводников якоря;

$i_2$ — ток в поперечной цепи амплидина, *а*.

Размагничивающее действие на О. У. оказывают не только коммутационные, но и вихревые токи в железе якоря и эффект от гистерезиса [6].

Учет задерживающего влияния вихревых токов может быть произведен путем увеличения постоянной времени О.У. ($T_y$ или $T_1$) на величину постоянной времени $T_e$ вихревых токов, которые по своему действию по Рюденбергу заменяются одним эквивалентным фиктивным короткозамкнутым витком.

Экспериментально суммарные размагничивающие ампервитки коммутационной реакции якоря МПТ и ампервитки от вихревых токов могут быть определены по методу автора [14] — по горизонтальному катету реактивного треугольника, полученному из опытов холостого хода и короткого замыкания.

В [43 а] приведено опытное разделение н.с. от коммутационной Р.Я. и н.с. от вихревых токов. Первая составляет примерно 2/3, а вторая 1/3 от их суммарной н.с., причем, первая составляет около 25÷35% от суммарной н.с., действующей по продольной оси.

При переходных процессах реакция коммутационных токов выполняет роль отрицательной обратной связи, увеличивая быстродействие машины, уменьшая постоянную времени и коэффициент усиления.

## § 4. Факторы, влияющие на быстродействие ЭМУ

Вопрос об увеличении быстродействия МПТ, т. е. уменьшения их постоянных времени, хорошо известен и ЭМУ в этом вопросе не составляет исключения.

Рассмотрим подробно, от каких факторов зависит постоянная времени основной обмотки управления ЭМУ

$$T_1 = \frac{L_1}{r_1} = \frac{\psi}{I_1 r_1} = \frac{w \Phi}{I_1 r_1} = \frac{\sigma \cdot w \Phi_N}{U_1}.$$

С целью уменьшения $T_1$ надо включить в цепь О.У. добавочное сопротивление, при котором, однако, придется подводить к ней бо́льшее напряжение $U_b = \alpha U_1$, где $\alpha$ — коэффициент форсировки напряжения равен

$$\alpha = \frac{U_b}{U_1} = \frac{r + R}{r}.$$

Тогда

$$T = \frac{\sigma w \Phi_N}{U_b} = \frac{\sigma w \cdot \Phi_N}{\alpha U_1}. \qquad (a)$$

Подставив

$$r = \frac{l w}{\gamma \cdot q} \text{ и } j = \frac{I_1}{q},$$

получаем

$$T = \frac{\gamma \sigma \Phi_N}{a j l}.$$

Из этой формулы следует, что постоянная времени О.У. не зависит от числа ее витков, и она тем меньше, чем выше взята плотность тока $j$ в О.У.

При этом уменьшаются сечение и вес меди О.У., т. е. постоянная времени и вес меди О.У. прямо пропорциональны.

Подставив в последнюю формулу

$$\Phi_N = \frac{60 E_a}{p n N},$$

получим после преобразования

$$T = \frac{\gamma \sigma}{a j l} \cdot \frac{1}{V_a \cdot AS} \cdot \frac{P_N}{2 p} \quad (б)$$

или

$$T = \frac{\gamma \sigma}{4 a j l} \cdot \frac{1}{f} \cdot \frac{E}{w_a}, \quad (в)$$

где

$$f = \frac{p n}{60}, \quad w_a = \frac{N}{4 a}, \quad V_a = \frac{\pi D_a}{60},$$

$$AS = \frac{N I_a}{2 a \pi D}.$$

Анализ формул (а), (б) и (в) приводит к выводам, что для уменьшения постоянной времени О.У. необходимо:

1) применять форсировку возбуждения от источника напряжения;

2) допускать большую плотность тока в О.У., для чего необходимы обмоточные провода с теплостойкой изоляцией;

3) скорость вращения якоря принимать предельной по условиям механической прочности и спокойной коммутации;

4) число полюсов выбирать по возможности большим;

5) якорь выполнять высокоиспользованным (большие $AS$, $j$);

6) обмотку якоря выбирать с наименьшим значением $\frac{a}{p}$, т. е. простую волновую или в крайнем случае сложную волновую;

7) число коллекторных пластин $K$ брать возможно большим с целью уменьшения числа витков $w_s$ в секции;

8) предусматривать второй зазор у дополнительных полюсов с целью уменьшения постоянной времени Д.П. за счет увеличения магнитного сопротивления их цепи.

9) применять немагнитные материалы для станин и подшипниковых щитов, расслоенную магнитную цепь с целью уменьшения задерживающего влияния вихревых токов;

10) использовать электротехническую сталь с пониженным значением удельной магнитной энергии.

## § 5. Роль дополнительных обмоток в амплидине

Кроме основной обмотки управления и необходимого числа обмоток обратной связи для регулирования того или иного числа параметров, в амплидине могут быть еще дополнительные сериесные и шунтовые обмотки по обеим осям, предназначенные для увеличения коэффициента усиления.

Эти дополнительные обмотки, во-первых, усложняют конструкцию и увеличивают габариты амплидина; во-вторых, в силу их индуктивности увеличивают время нарастания выходного напряжения. Поэтому обычно при проектировании амплидина стремятся добиться необходимого коэффициента усиления без указанных добавочных обмоток.

При наличии добавочной обмотки в поперечной оси обмотка якоря нагружается более равномерно. Эта обмотка может быть шунтовой или сериесной.

Шунтовая обмотка питается от выходного напряжения; сериесная обмотка включается последовательно с поперечной цепью якоря амплидина. В новой серии ЭМУ (см. ВЭП, 57 г. № 11) при наличии добавочной С.О. удалось снизить поперечный ток в 1,5—1,8 раза и тем самым значительно улучшить условия коммутации тока поперечной цепи.

С целью уменьшения остаточного напряжения в ЭМУ применяется еще одна добавочная — размагничивающая — обмотка. В проекте новой серии (см. ВЭП, 57 г., № 11) предусмотрена размагничивающая обмотка переменного тока. Напряжение питания ее 3—7 *в* подводится от части витков статора приводного асинхронного двигателя. При этом отпадает надобность в специальном трансформаторе, а на работу А.Д. такая схема практически влияния не оказывает.

При помощи размагничивающей обмотки остаточное напряжение удается снизить в 3 ÷ 3,5 раза. Размагничивающая обмотка состоит из двух катушек с малым числом витков и наматывается на ярмо статора амплидина в зоне большого паза.

Иногда амплидин снабжается еще одной стабилизирующей обмоткой по продольной оси, предназначенной для уменьшения изменений выходного напряжения. Эта обмотка включается на выходное напряжение через Т.Н. или через конденсатор. При постоянном выходном напряжении $U_3$ ток в стабилизирующей обмотке не протекает. При изменении $U_3$ в ту или иную сторону в стабилизирующей обмотке появляется ток, препятствующий изменениям выходного напряжения.

## § 6. Переходные процессы в амплидине и устойчивость

Рассмотрение переходных процессов в амплидине дает возможность судить об условиях его устойчивости и самовозбуждения.

Рассмотрим эти процессы только для двух случаев:

1) при точной компенсации и отсутствии добавочных обмоток;

2) прн неточной компенсации (недокомпенсация или перекомпенсацня) и отсутствии добавочных обмоток.

1. Продольная Р. Я. точно скомпенсирована; в амплидине нет добавочных обмоток, есть только основная обмотка управления.

В этом случае

$$M = M_{\text{к}1} \quad M_{d1} = 0,$$

где $M$ — результнрующий коэффициеит взаимоиндукции;

$M_{\text{к}1}$, $M_{d1}$ — коэффициенты взаимоидукции обмоткн управления с К.О. н с обмоткой якоря по продольной оси.

Уравнения для трех цепей амплиднна имеют вид, (см. рис. 2).

$$U_1 = r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt}, \tag{1a}$$

$$e_2 = k_1 i_1 = r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt}, \tag{2a}$$

$$e_3 = k_2 i_2 = r_3 i_3 + L_3 \frac{di_3}{dt}, \tag{3a}$$

где $L_1$, $L_2$, $L_3$ — соответственно полные коэффициеиты самоиндукции О.У., поперечиой цепи и выходной цепи;

$r_1$, $r_2$, $r_3$ — их активные сопротивления.

Решенне проведем операторным методом, учитывая начальные условия, а именно при $t = 0$

$$i_1 = i_2 = i_3 = 0$$

и согласно (1), (2), (3)

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{di_2}{dt} = \frac{di_3}{dt} = 0$$

$$U_1 = r_1 \left( 1 + \frac{L_1}{r_1} p \right) i_1 = r_1 (1 + p T_1)\, i_1;$$

$$i_1 = \frac{U_1}{r_1 (1 + p T_1)} = \frac{U_1}{r_1 T_1} \cdot \frac{1}{p + \frac{1}{T_1}}$$

обозначим

$$\frac{1}{T_1} = a; \quad \frac{1}{p + \frac{1}{T_1}} = \frac{1}{p + a} \div \frac{1 - e^{-at}}{a}.$$

Следовательно, ток в О.У. равен:

$$i_1 = \frac{U_1}{r_1} a \cdot \frac{1 - e^{-at}}{a} = \frac{U}{r_1}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right).$$

Решим второе уравнение

$$e_2 = k_1 i_1 = r_2 (1 + p T_2) i_2;$$

$$i_2 = \frac{k_1 i_1}{r_2 (1 + p T_2)} = \frac{k_1 U_1}{r_1 r_2 T_2} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{t}{T_1}}}{p + \frac{1}{T_2}}.$$

Обозначим

$$\frac{1}{T_2} = b \qquad \Bigg| \qquad e^{-at} \doteq \frac{p}{p+a}$$

$$i_2 = \frac{k_1 i_1}{r_1 r_2} b \cdot \frac{1 - e^{-at}}{p + b} \qquad \Bigg| \qquad 1 - e^{-at} = \frac{a}{p+a}$$

$$i_2 = \frac{k_1 U_1}{r_1 r_2} \cdot \frac{ab}{(p+a)(p+b)} \qquad \Bigg| \qquad \frac{1}{(p+a)(p+b)} \doteq \frac{1}{ab}\left(1 + \frac{be^{-at} - ae^{-bt}}{a - b}\right)$$

$$i_2 = \frac{k_1 U_1}{r_1 r_2}\left(1 - \frac{T_2 e^{-\frac{t}{T_2}} - T_1 e^{-\frac{t}{T_1}}}{T_2 - T_1}\right)$$

при $$T_1 = T_2 \ (a = b)$$

$$\frac{1}{(p+a)(p+b)} = \frac{1}{(p+a)^2} \doteq \frac{1}{a^2}\left[1 - (1 + at) e^{-at}\right]$$

$$i_2 = \frac{k_1 U_1}{r_1 r_2}\left[1 - \left(1 + \frac{t}{T_1}\right) e^{-\frac{t}{T_1}}\right]$$

Третье уравнение

$$e_3 = k_2 i_2 = i_3 r_3 + L_3 \frac{di_3}{dt}.$$

Решим третье уравнение, т. е. найдем ток в выходной цепи—ток нагрузки

$$U_3 \approx e_3 = k_2 i_2 = i_3 r_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} = r_3 (1 + p T_3) i_3;$$

$$i_3 = \frac{e_3}{r_3(1+pT_3)} = \frac{k_2 i_2}{r_3(1+pT_3)},$$

где $i_2$ — дано выше.

Решение третьего уравнения дает (см. приложение на стр. 48).

$$i_3 = \frac{k_1 k_2 U_1}{r_1 r_2 r_3}\left\{1 - \frac{1}{(T_1-T_2)(T_1-T_3)(T_2-T_3)}\left[T_1^2(T_2-T_3)e^{-\frac{t}{T_1}} - \right.\right.$$
$$\left.\left. - T_2^2(T_1-T_3)e^{-\frac{t}{T_2}} + T_3^2(T_1-T_2)e^{-\frac{t}{T_3}}\right]\right\}$$

2. Продольная Р.Я. не точно скомпенсирована (имеет место недокомпенсация или перекомпенсация), добавочные обмотки отсутствуют.

Как будет показано ниже, неточная компенсация продольного поля якоря (недокомпенсация или перекомпенсация) может явиться причиной неустойчивого режима в виде колебательного процесса, который в случае недокомпенсации протекает с возрастающей амплитудой колебаний (самовозбуждение амплидина).

При обычных допущениях (магнитная система не насыщена, параметры постоянны, характеристики ЭМУ линейные) и при расположении обеих пар щеток на нейтралях, когда нет взаимоиндукции обмоток управления и компенсационной обмотки с поперечной цепью амплидина, можно написать уравнения для трех его цепей.

Обозначим:

$M_{k1}$ — коэффициент взаимоиндукции К.О. и О.У.;

$M_{d1}$ — коэффициент взаимоиндукции продольной цепи якоря и О. У.

$$M = M_{k1} - M_{d1}.$$

При точной компенсации ($M = 0$) нижеприводимые три уравнения должны иметь вид, как в первом случае.

Для цепи обмотки управления

$$U_1 = i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M \frac{di_3}{dt}. \qquad (1б)$$

Знак плюс соответствует перекомпенсации, знак минус — недокомпенсации.

Для поперечной к.з. цепи амплидина

$$e_2 = r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} = k_1 i_1 \pm k_3 i_3. \qquad (2б)$$

Знак плюс по-прежнему соответствует перекомпенсации, а знак минус — недокомпенсации. При точной компенсации $k_3 = 0$, и уравнение (2б) переходит в (2а).

Для продольной цепи якоря и нагрузки имеем

$$e_3 = k_2 i_2 = R_3 i_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} \pm M \frac{di_1}{dt}, \qquad (3б)$$

где

$$R_3 = r_3 + r_2 + r_к$$

$$L_3 = L_3' + L_2 - L_к$$

$r_3$, $r_2$, $r_к$ - активное сопротивление иагрузки, якоря и компенсационной обмотки;

$L_3'$, $L_2$, $L_к$ - их индуктивиые сопротивления.

В случае точной компенсации уравнение (3б) переходит в (3а), если пренебречь величииой $r_к$.

Итак, в рассматриваемом случае, учитывая ранее указаииые иачальные условия, имеем следующне три уравнеиня:

$$U_1 = r_1 (1 + p T_1) i_1 \pm M p i_3 \qquad (1б)$$

$$e_2 = k_1 i_1 \pm k_3 i_3 = r_2 (1 + p T_2) i_2 \qquad (2б)$$

$$e_3 = k_2 i_2 = R_3 (1 + p T_3) i_3 \pm M \frac{di_1}{dt} \cdot \qquad (3б)$$

Решение в.у. трех уравнений [23а] дает

$$i_3 = \mp \frac{U_1 M}{L_2 L_3} \cdot \frac{p^2 + b_1 p + b_2}{p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3}.$$

Приведем значения коэффициентов характеристического уравнеиия для наиболее неустойчивого случая, когда постояиные времени равны, т. е. когда

$$T_1 = T_2 = T_3 = T.$$

Тогда

$$a_1 = \frac{3}{T}, \qquad (1)$$

$$a_2 = \frac{3 \mp 0{,}23\gamma}{T^2}, \qquad (2)$$

$$a_3 = \frac{1 \mp \gamma}{T^3}, \qquad (3)$$

где

$$\gamma = \frac{k_2 k_3}{r_2 R_3}. \qquad (4)$$

Верхний зиак относится к перекомпенсации ($M>0$), иижнний — к иедокомпеисации ($M<0$).

Для определеиия устойчивости системы примеияют критерий Гурвица. Для иашего характеристического уравнеиия 3-й степени

$$p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0$$

необходимы три условия устойчивости

$$a_1 > 0, \begin{vmatrix} a_1 & 1 \\ a_3 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_3 > 0 \text{ и } a_3 > 0.$$

Первое условие всегда соблюдается. Что касается второго и третьего условий устойчивости, то они зависят от величины и знака $\gamma$ в выражениях (2) и (3).

а) Недокомпенсация реакции якоря (нижние знаки в выражениях (2) и (3)).

Наличие комплексных корней кубического уравнения определяется положительностью дискриминанта, т. е. неравенством

$$\frac{B^2}{4} + \frac{A^3}{27} > 0,$$

где $A$ и $B$ выражаются через коэффициенты характеристического кубического уравнения равенствами

$$A = a_2 - \frac{a_1^2}{3}, \quad B = a_3 + \frac{2a_1^3}{27} - \frac{a_1 a_2}{3}.$$

Если подставить вышеуказанные значения $a_1$, $a_2$ и $a_3$ с нижним знаком, соответствующим недокомпенсации, то получим

$$A = -\frac{0{,}23\,\gamma}{T^2}, \quad B = \frac{1{,}23\,\gamma}{T^2}$$

откуда

$$\frac{B^2}{4} + \frac{A^3}{27} = \frac{\gamma^2}{T^6}(0{,}38 - 0{,}00045\,\gamma).$$

Для того чтобы величина в скобках последнего выражения была меньше нуля, необходимо, чтобы $\gamma > 850$.

Но в большинстве случаев $\gamma$ невелико. В данном случае (нижние знаки в выражениях (2) и (3)) первое и третье условия устойчивости Гурвица всегда выполняются, а второе только при $\gamma < 4{,}7$. При $\gamma > 4{,}7$ значения $a_1$, $a_2$, $a_3$ всегда положительны.

Характеристическое уравнение для практически возможных значений $\gamma$ имеет один вещественный отрицательный корень и два комплексных корня с положительной вещественной частью, т. е. имеет место колебательный процесс с возрастающей амплитудой колебаний.

б) Перекомпенсация реакции якоря (верхние знаки в выражениях (2) и (3)).

Для тех же условий ($T_1 = T_2 = T_3 = T$) имеем

$$A = +\frac{0{,}23\,\gamma}{T^2}, \qquad B = -\frac{1{,}23\,\gamma}{T^3}.$$

Дискриминант

$$\frac{B^2}{4}+\frac{A^3}{27}>0,$$

т. е. и в случае перекомпенсации характеристическое уравнение имеет два комплексных корня — имеет место колебательный процесс.

Поэтому в амплидине так важна возможно более точная компенсация и с этой целью его проектируют с перекомпенсацией при наличии шунта к компенсационной обмотке.

Из рассмотрения условий Гурвица для случая перекомпенсации видно, что первое и второе условие будут выполняться при любом значении $\gamma$, а третье — при $\gamma < 1$. Из этого ясно, что в случае перекомпенсации (в отличие от недокомпенсации) вещественные части комплексных корней будут всегда отрицательны, т. е. колебательный процесс будет затухающим при любом $\gamma$.

Вещественный корень становится положительным при $\gamma > 1$. В этом случае получается теоретически бесконечное экспоненциальное нарастание тока $i_3$, т. е. так называемое явление **самовозбуждения** машины. Практически, однако, неограниченное нарастание тока не может иметь места как вследствие отсутствия источника бесконечной мощности, так и потому, что в этих условиях в результате насыщения систему нельзя рассматривать как линейную.

Из вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. При неточной компенсации продольной реакции якоря амплидина всегда имеет место колебательный процесс.

2. При перекомпенсации реакции якоря этот колебательный процесс всегда затухающий, но сравнительно небольшая величина перекомпенсации может явиться причиной самовозбуждения амплидина.

3. Недокомпенсация реакции якоря не может быть причиной самовозбуждения амплидина, но при определенной величине недокомпенсации наступает колебательный режим с возрастающей амплитудой колебания.

4. С точки зрения устойчивого режима работы амплидина наименее благоприятен случай равенства постоянных времени его отдельных цепей и наиболее благоприятен случай, когда постоянные времени значительно отличаются друг от друга [23 а].

5. Добавочные сериесные обмотки (по любой оси амплидина) увеличивают как коэффициент усиления, так и время нарастания напряжения на его выходе. При этом добавочная обмотка по поперечной оси способствует более равномерному распределению тока в обмотке якоря.

Добавочная шунтовая обмотка по поперечной оси не только способствует разгрузке якоря амплидина от неравномерного распределения тока, но наряду с этим несколько уменьшает время нарастания напряжения на выходе.*

* О роли добавочных обмоток см. § 5, а также в [23 а].

## § 7. Магникон

В Англии разработан недавно новый тип ЭМУ, названный «магниконом». Он используется преимущественно в качестве электромашинного регулятора, действующего автоматически как возбудитель синхронного генератора небольшой мощности.

Как и амплидин, магникон имеет две промежуточные щетки, замкнутые накоротко, т. е. представляет собою двухступенчатый ЭМУ. Его основные отличия от амплидина следующие:

1. При двухполюсном возбуждении в якоре выполнена четырехполюсная простая петлевая обмотка с укорочением 0,5 без уравнительных соединений, что, как показано ниже, улучшает коммутацию и позволяет в малых машинах не иметь дополнительных полюсов.

Между прочим, эта идея применима и целесообразна в любой МПТ с промежуточными щетками. Она используется и в ЭМУ продольного поля.

2. Магникон имеет четыре полюса - два регулировочных и два «главных», но обмотки возбуждения (управления) О.У. и обратной связи О.О.С. расположены только на первых; на «главных» полюсах расположена только компенсационная обмотка.

Конструктивная схема магникона представлена на рис. 3, где

*qq* — к.з. промежуточные щетки;

*dd*—главные (выходные) щетки.

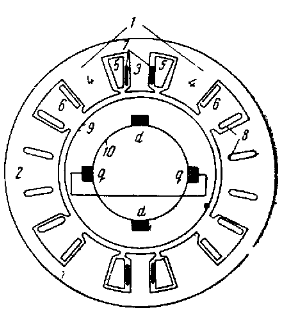



Рис. 3 Конструктивная схема магникона: *1* — регулировочный полюс; *2* — «главный» полюс; *3* — «зуб насыщения»; *4* — «противодействующие» зубцы; *5* — обмотка управления (*О.У.*); *6* — обмотка обратной связи (*О.О.С.*); *7* — демпферное кольцо; *8* — компенсационная обмотка; *9* — якорь; *10* — коллектор

Спинка статора набирается из листовой стали, составляя одно целое с явно выраженными полюсами.

Регулировочный полюс (рис. 4) состоит из трех зубцов — среднего узкого вставного *3* и двух более широких *4*.

Узкий зубец крепится к спинке статора, охватывается демпферным кольцом *7* и обмоткой управления *5*. Широкие зубцы охватываются обмоткой обратной связи *6*.

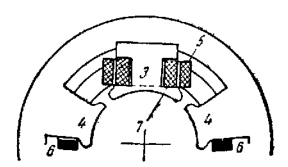



Рис. 4. Регулировочный полюс магникона

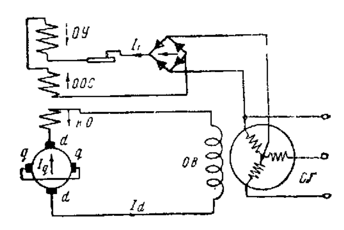



Рис. 5. Принципиальная схема магникона

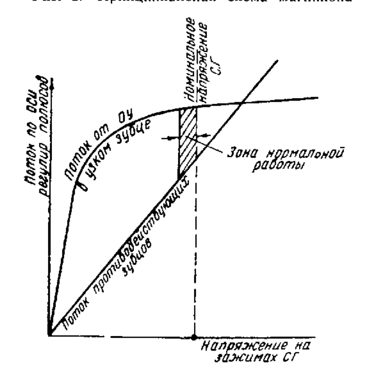



Рис. 6. Кривые потоков регулировочного полюса магникона в функции от напряжения *С. Г.*

*О.У.* и *О.О.С.* соединены последовательно, но встречно (см. рис. 5), и через выпрямительный мост включаются между одним зажимом и нулем синхронного генератора. Ось регулировочного полюса назовем продольной и обозначим *dd*.

Средний узкий зубец регулировочного полюса должен быть полностью насыщен уже при самом низком значении напряжения, при котором должен работать *С.Г.* с тем, чтобы создаваемый им поток был примерно постоянным для всего диапазона регулирования напряжения *С.Г.* (см. рис. 6).

Широкие зубцы регулировочного полюса не насыщены, так как обмотка обратной связи выполняется с малым числом витков, ее н.с. и создаваемый ею поток малы, а зубец имеет большое сечение. Поэтому поток в широких зубцах прямо пропорционален напряжению *С.Г.*

Обмотка *О.О.С.* действует против *О.У.*, поэтому результирующий поток магникона (и его мощность на выходе) обусловливается разностью упомянутых потоков, как показано на рис. 6.

Каждому напряжению *С.Г.* соответствует определенный результирующий поток и определенная выходная мощность магникона.

Демпферное кольцо, охватывающее узкий зубец, во-первых, поддерживает поток этого зубца постоянным при внезапных и значительных колебаниях напряжения *С.Г.*, а во-вторых, подавляет высшие гармоники при питании ртутных выпрямителей.

«Главные» полюсы расположены по поперечной оси *qq*. В пазах этих полюсов расположена компенсационная обмотка (*К.О.*) для компенсации реакции якоря выходного тока магникона.

Обозначим: $I_1$ — ток управления; $I_q$ — ток к.з. цепи; $I_d$ — выходной ток магникона через обмотку возбуждения (*О.В.*) синхронного генератора (*С.Г.*).

Обмотки *О.У.* и *О.О.С.* и к.з. цепь якоря образуют первую ступень магникона. Ток в к.з. цепи создает поперечный поток по оси *qq*, индуктирующий выходную э.д.с., которая снимается со щеток по оси *dd*. Короткозамкнутая цепь и выходная цепь образуют вторую ступень магникона. Ток $I_d$ протекает через *К.О.* и *О.В.* синхронного генератора.

Компенсационная обмотка предназначена для компенсации реакции якоря от тока $I_d$ второй ступени. Поток *К.О.* действует согласно с потоком возбуждения первой ступени по оси *dd*.

При соответственной шунтировке перекомпенсированной *К.О.* напряжение *С.Г.* изменяется в пределах $\pm 2\%$ от холостого хода до полной нагрузки. При внезапном включении полной нагрузки переходной процесс в магниконе длится 0,2 *сек*, после чего выходное напряжение снова принимает номинальное значение. То же самое имеет место и при колебаниях скорости вращения *С.Г.*

При наличии дополнительных полюсов мощность магниконов может составлять десятки киловатт в единице.

Опытные данные магникона приведены в [69].

Остановимся еще раз на отличиях магникона от амплидина (см. рис. 7, *а*, *б*, *в*).

В обычной МПТ и в амплидине обмотка якоря имеет такое же число полюсов, как и система возбуждения (шаг обмотки $y \approx \tau$). В такой машине, как известно, кривая н.с. якоря имеет треугольную форму с максимумом между полюсами.

В магниконе обмотка якоря четырехполюсная, а система возбуждения двухполюсная (два регулировочных полюса на рис. 3). На главных полюсах нет обмотки возбуждения. Шаг обмотки якоря $y = \frac{\tau}{2}$.

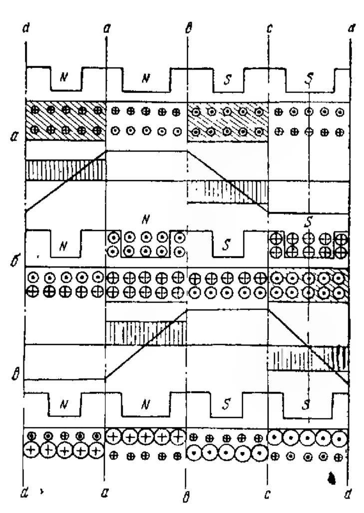



Рис. 7. Токи в проводниках, распределение токов на периферии якоря и кривые поля магникона: *а* — для намагничивающих токов (малые кружки); *б* — для нагрузочных токов (большие кружки); *в* — для суммы обоих токов

При этом в верхних и нижних проводниках в пазах якоря под регулировочными полюсами токи, индуктированные полем, текут в одном направлении, а под другой парой полюсов, т. е. в зонах между регулировочными полюсами, токи в верхних и нижних проводниках якоря текут в разном направлении (рис. 7, *а*).

Это обстоятельство обусловливает не треугольную, а трапецоидальную форму кривой поля.

Токи в якоре, индуктированные поперечным потоком, ось которого совпадает с линией к.з. щеток, сдвинуты на 90° по направлению вращения, как показано на рис. 7, *б*.

На рисунке эти токи показаны большими кружками, так как эти токи — токи нагрузки — примерно в три раза больше, чем намагничивающие токи от поля возбуждения. Реакция этих токов, как уже упоминалось, подавляется н.с. компенсационной обмотки, расположенной на невозбужденных «главных» полюсах.

Результирующие, действительные токи в проводниках якоря равны сумме намагничивающих токов (рис. 7, *а*) и нагрузочных токов (рис. 7, *б*) и представлены на рис. 7, *в*.

Из рисунка, между прочим, следует, что потери в меди якоря повсюду одинаковы, так как в любой зоне якоря один ток (верхний или нижний в пазу) большой, а другой (нижний или верхний) малый.

Под главными полюсами нет магнитного поля, поэтому К.О. должна компенсировать только поток поперечной Р.Я. (по оси «главных» полюсов) и располагается по поперечной оси.

Нулевые точки поля сдвигаются в середину между регулировочными и главными полюсами, где и располагаются выходные щетки. При этом в коммутируемой к.з. секции не будет возникать значительная реактивная э.д.с., вредная для коммутации.

Именно поэтому в малых магниконах можно обойтись без добавочных полюсов.

Если же магникон выполняется на большую мощность, то следует иметь в виду указанное ниже.

Каждый из четырех добавочных полюсов снабжается двумя обмотками, из которых одна включается в цепь к.з. щеток, а другая в рабочую цепь и имеет половину числа витков обычной обмотки добавочных полюсов.

Указанное включение обмоток добавочных полюсов обеспечивает хорошую коммутацию как щеток *qq*, так и щеток *dd**.

Распределение потенциальной кривой напряжения по коллектору представлено на рис. 8.

Как легко понять из рис. 8, максимум напряжения от поля возбуждения имеется между к.з. щетками *qq*. Между выходными щетками *dd* основное поле возбуждения не создает напряжения, выходное напряжение обусловливается потоком от тока в поперечной цепи.

---

* Подробнее об этом см. [10]. С. 197.

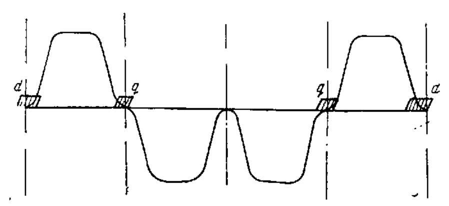



Рис. 8. Потенциальные кривые по коллектору магникона

Каковы достоинства и недостатки магникона с его укороченной обмоткой по сравнению с ЭМУ поперечного поля (амплидином) с неукороченной обмоткой?

Магникон имеет обмотки возбуждения на двух полюсах и компенсационную обмотку на двух других, а не на всех четырех. Вылеты обмотки в магниконе короче благодаря укороченному шагу.

Но зато часть обмотки якоря в магниконе, как было показано, обтекается разностью токов, т. е. не вполне используется.

С другой стороны трапецоидальное поле в магниконе более равномерно под полюсом, чем в машине с неукороченной обмоткой, где н.с. имеет форму треугольника с нулем под серединой полюса.

Более равномерное распределение потока и магнитной индукции в магниконе дает лучшее использование намагничивающего тока и компенсирует тот недостаток, что часть обмотки якоря обтекается разностью токов (тока нагрузки и намагничивающего тока).

Для машин без добавочных полюсов (малые машины), надо полагать, магникон выгоднее (дешевле) амплидина; для машин с добавочными полюсами, решая этот вопрос, требуется сравнить габариты, веса и стоимости обоих видов ЭМУ.

## § 8. Метадин

Метадин был предложен в начале тридцатых годов текущего столетия академиком К. И. Шенфером [70] и независимо от него итальянским инженером Пестарини [71]. Как и амплидин, метадин представляет собой машину поперечного поля, с той разницей, что:

1) в амплидине реакция якоря полностью скомпенсирована, а в метадине неполностью;

2) амплидин обычно работает при постоянстве выходного напряжения, а метадин — при постоянстве выходного тока;

3) промежуточные щетки в амплидине всегда замкнуты накоротко, в метадине — либо не замкнуты (метадин-трансформатор), либо замкнуты (метадин-генератор);

4) амплидин не бывает без статорной обмотки (на полюсах), метадин-трансформатор может быть и без обмотки полюсов.

Раздвоение (расщепление) полюсов характерно для всех машин поперечного поля — для генератора Розенберга, для амплидина, метадина и т. д.

Это расщепление полюсов имеет своей целью улучшение коммутации путем создания нейтральной зоны между половинками полюса, свободной от магнитного потока.

Рассмотрим прежде всего простейшую схему метадина без обмотки возбуждения на полюсах, т. е. метадин — преобразователь, или трансформатор, преобразующий энергию постоянного напряжения в энергию постоянной величины тока. Компенсационная обмотка (при неполной компенсации) может быть, но может и отсутствовать (см. рис. 9).

На рис. 10 дана такая же схема метадин—трансформатора с обмоткой возбуждения, показанная на рисунке только на одном раздвоенном полюсе. *О.В.* может быть расположена и не так, как показано на рисунке, а отдельно на каждой половине раздвоенного полюса.

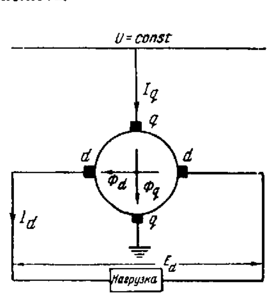



Рис. 9. Схема метадин-трансформатора (преобразователя) без обмотки возбуждения

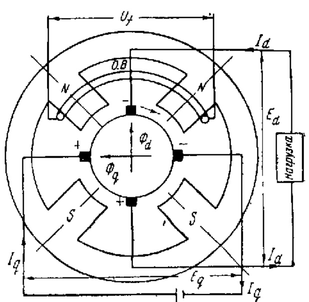



Рис. 10. Схема метадин-трансформатора (преобразователя) с обмоткой возбуждения

Для вращения метадин-трансформатора нужен двигатель небольшой мощности — только для покрытия потерь. Двигатель вращает метадин при постоянном числе оборотов.

Свойство метадин-трансформатора работать при постоянной силе тока делает его весьма ценным в тяге — для безреостатного пуска в ход двух тяговых двигателей по схеме «8» (схема «восьмерки»), как показано на рис. 11.

При этом метадин работает как положительный или отрицательный бустер. Его напряжение меняется реверсировкой от $+U$ до $-U$, и, следовательно, общее напряжение на обоих двигателях меняется от 0 до 2 $U$, а на каждом двигателе — от нуля до $U$.

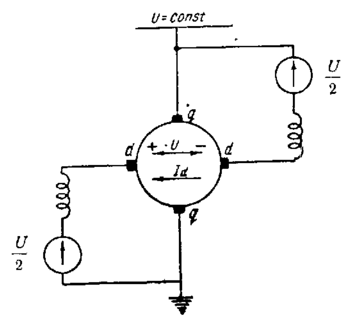



Рис. 11. Метадин-трансформатор по схеме «восьмерки» для питания двух тяговых двигателей

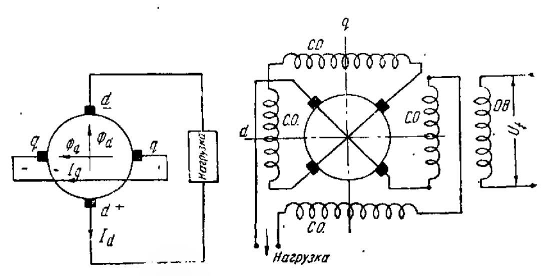



Рис. 12. Схема метадин-генератора с к.з. промежуточными щетками

Рис. 13. Схема метадин-генератора с сериесными обмотками по обеим осям в к.з. цепи и в выходной цепи

Подробно эта схема в двух вариантах рассмотрена в [71].

Метадин-генератор отличается от метадин-трансформатора тем, что он преобразовывает механическую энергию в электрическую. Поэтому для привода его требуется двигатель на полную отдаваемую мощность. Схема метадин-генератора представлена на рис. 12.

Для получения желательных рабочих характеристик метадин снабжается добавочными сериесными обмотками, действующими согласно или встречно, либо по той же оси, что и текущий в них ток, либо по перпендикулярной оси (см. рис. 13). Иногда метадин снабжается также и шунтовой обмоткой самовозбуждения.

Как генератор метадин последнее время заменен амплидином.

Об анализе переходных режимов метадина см. [72].

# Глава III

## ЭМУ ПРОДОЛЬНОГО И ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОГО ПОЛЯ

ЭМУ продольного поля обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с усилителями с поперечным полем.

Многоступенчатые ЭМУ с продольным полем имеют более высокие коэффициенты усиления (и добротности *) и могут быть более быстродействующими.

К преимуществам ЭМУ с продольным полем следует отнести значительный диапазон мощностей, что дает возможность использовать их в мощных системах автоматического регулирования в качестве главных возбудителей. Создание ЭМУ с поперечным полем на большую мощность ограничено тяжелыми условиями коммутации в них.

ЭМУ с продольным полем могут иметь одну, две, три и более ступеней усиления в зависимости от схемы и числа полюсов.

В одноступенчатом исполнении они имеют независимую обмотку возбуждения и обмотку самовозбуждения шунтовую или сериесную (одноступенчатый рототрол).

В двухступенчатом исполнении они бывают либо в виде каскада двух машин (например, рапидин), либо в одной машине (двухступенчатый рототрол).

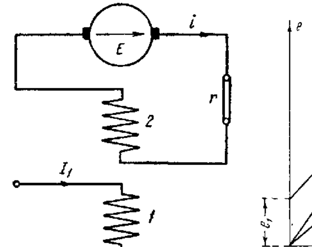
### § 1. Одноступенчатый рототрол

Одноступенчатый рототрол представляет собою МПТ продольного поля с двумя обмотками возбуждения по продольной оси: независимой *1* и сериесной *2* (см. рис. 14), где $r$ сопротивление всей сериесной цепи, включая нагрузку рототрола.

При невозбужденной независимой (регулировочной) обмотке прямая $ir$ не должна пересекать кривую холостого хода $e_2$ от сериесной обмотки (см. рис. 15).

Возбуждение независимой (регулировочной) обмотки смещает кривую $e_2$ на величину $e_1$, обусловленную потоком регулировочной

* Коэффициент добротности = $\frac{k_y}{T}$.



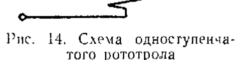



Рис. 14. Схема одноступенчатого рототрола

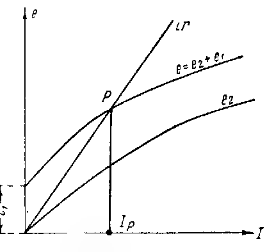



Рис. 15. Процесс возбуждения одноступенчатого рототрола

обмотки. Тогда кривая $e_1 + e_2$ пересекает прямую $ir$ в точке $P$ при токе нагрузки $I = I_P$.

В ненасыщенной зоне работы машины ток и результирующая э.д.с. $e = e_1 + e_2$ пропорциональны величине $e_1$ и току $I_1$. При увеличении нагрузки прямая $ir$ будет иметь бо́льший наклон, и машина возбудится до бо́льшего напряжения (правее точки $P$).

Для регулирования тока или иного параметра рототрол снабжается добавочной обмоткой обратной связи. Так, например, на рис. 16 рототрол питает обмотку возбуждения (*О.В.*) генератора постоянного тока *ГПТ*, ток $i$ в которой надо регулировать так, чтобы выходной ток $I$ имел ту или иную постоянную величину. Для этого рототрол снабжается обмоткой обратной связи *3*, включенной в цепь нагрузки генератора встречно к обмотке управления *1* и к сериесной обмотке *2*. Действие обмотки обратной связи поясняется рис. 17.

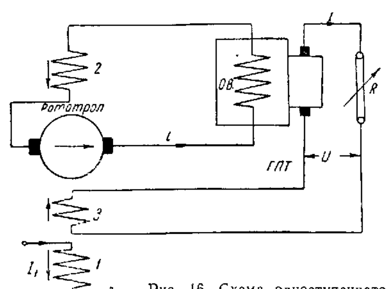



Рис. 16. Схема одноступенчатого рототрола — возбудителя ГПТ

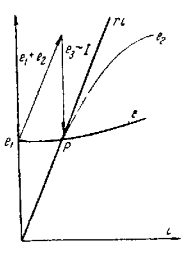



Рис. 17 Процесс возбуждения рототрола (см. рис. 16)

В случае увеличения силы тока *I* увеличится э.д.с. $e_3$ от обмотки *3*, уменьшится результирующий поток, э.д.с. и ток рототрола, а следовательно, напряжение и ток *ГПТ*. Ток будет уменьшаться до тех пор, пока не достигнет прежней величины, соответствующей току $I_1$ обмотки управления *1*.

При необходимости изменення силы тока *I ГПТ* надо соответственно изменить ток $I_1$ обмотки управления.

Коэффициент усиления одноступенчатого рототрола невелнк и составляет около 600 –800; в двухступенчатом он бывает порядка 40 000, а в трехступенчатом — свыше 100 000.

Наибольшее распространение получили рототролы с двумя ступенями усиления, они будут рассмотрены инже.

## § 2. Рапидин

Фирма «Сименс» разработала новый тип электромашинного усилителя — рапидин.

Рапидин представляет собой каскадный усилитель из двух машин *А* и *Б* (см. рис. 18) на одном валу, с общей шихтованной станиной. Чаще всего обе машины одинаковы по размерам, но компенсационная обмотка имеется только во второй машине *Б*, обмотка возбуждения которой питается от якоря первой машины *А*. Обе машины приводятся во вращение одним двигателем *Д*.

Достоинства и недостатки рапидина лучше всего выясняются при сопоставлении его с амплидином.

В амплидине обе ступени усиления сосредоточены в одной машине и имеют один якорь и один коллектор, что дает меньший расход стали, обмоточной и коллекторной меди и меньший объем, чем в двух машинах.

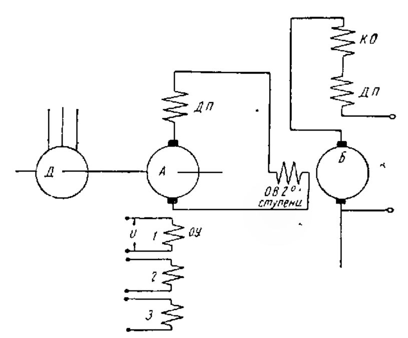



Рис. 18. Схема рапидина. *А* — первый якорь. *Б* — второй якорь; *Д* — приводной двигатель

Однако амплидин имеет и ряд существенных недостатков:

1. Наложение в нем тока поперечной цепи на ток выходной цепи увеличивает потери в обмотке якоря.

2. Увеличение потерь в обмотке якоря заставляет снижать плотность тока в якоре амплидина по сравнению с обычной машиной постоянного тока, что надо делать также по условиям коммутации в амплидине.

3. Компенсационную обмотку (*К.О.*) амплидина следует выполнить так, чтобы она полностью компенсировала продольную реакцию якоря, что не всегда удается, особенно в малых амплидинах, в которых не хватает места для необходимой *К.О.*

4. Следствием последнего недостатка является то, что остается некоторое влияние продольной реакции якоря на выходное напряжение.

Все вышеуказанные недостатки не столь значительны. Однако амплидину могут быть свойственны и такие недостатки, которые делают его применение невозможным.

5. Э.д.с. поперечного поля может оказаться в нем меньше, чем падение напряжения в щеточном контакте, и тогда никакого поперечного поля в нем вообще не возникнет.

6. Взаимоиндукция между *К.О.* и обмоткой управления *О.У.* может привести к колебаниям.

Последние два обстоятельства могут заставить перейти к разделению обеих ступеней усиления и выполнению их в двух машинах.

К достоинствам рапидина относятся:

1. Разделение обеих ступеней усиления, что дает свободный выбор числа витков первой ступени, которое можно увеличить.

2. Это дает большее напряжение для питания возбуждения второй ступени, и относительная роль падения напряжения в щеточном контакте становится малой.

3. Выполнение ступеней в разных машинах дает и то, что *К.О.*, имеющаяся только во второй ступени, не влияет на *О.У.* первой ступени.

4. Последнее устраняет возможность колебаний.

5. В рапидине нет трудностей, связанных с коммутацией, как в амплидине. Это позволяет максимально использовать вторую ступень по температурному пределу; правда, первая ступень (такая же, как и вторая) недоиспользуется.

Наряду с этим рапидин имеет и недостатки:

1. Наличие двух коллекторов.

2. Больший расход обмоточной меди.

Так как головки обмотки в рапидине короче, чем в амплидине (первый выполняется обычно четырехполюсным, а второй — двухполюсным), то расход обмоточной меди превышает ее расход в амплидине, но не вдвое.

В соответствии с таблицей при одинаковых коэффициентах усиления и постоянных времени расход меди в рапидине составляет 130% по отношению к расходу меди в амплидине.

3. Аксиальная длина рапидина несколько больше, чем у амплидина (108% для конкретного типа, приведенного в таблице). Однако это увеличение незначительно, так как в четырехполюсном исполнении аксиальный вылет обмотки короче, да и активную длину рапидина можно сделать несколько меньше.

4. Э.д.с. от остаточного магнетизма в рапидине на 20—30% выше, чем в амплидине, что дает бо́льший ток во второй ступени, но зато относительно меньшую роль играет падение напряжения в щеточном контакте.

**СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ АМПЛИДИНА И РАПИДИНА**

| Параметры | Амплидин | Рапидин |
|---|---|---|
| Длительная мощность, *квт* . . . . . | 1,4(100%) | 2,5(180%) |
| Скорость вращения, *об/мин* . . . . | 2920 | 2920 |
| Напряжение $U$, *в* . . . . . . . . . . | 200 | 200 |
| Ток $I$, *а* . . . . . . . . . . . . . . | 7 | 12,5 |
| Коэффициент усиления $k_y$ . . . . . | 1100 | 1900 |
| Постоянная времени $T$, *сек* . . . . . | 0,1 | 0,1 |
| Коэффициент добротности $\frac{k_y}{T}$, *сек*$^{-1}$ . . . . . . . . . . . . . . . | 11000(100%) | 19000(172%) |
| Диаметр станины, *мм* . . . . . . . . | 400 | 370 |
| Длина (без приводного двигателя), *мм* . . . . . . . . . . . . . . . . . | 620(100%) | 670(108%) |
| Объем, *м*$^3$ . . . . . . . . . . . . . | 7,8(100%) | 7,2(92%) |
| Объем листовой стали (в якоре и станине), *м*$^3$ . . . . . . . . . . . . | 7,5 | 7,5 |
| Расход меди, *кг* . . . . . . . . . . . | 16,6(100%) | 21,5(130%) |

## § 3. Магнавольт

В 1950 году фирма «Инглиш Электрик Компани» предложила новый вид ЭМУ под названием «магнавольт».

В этом ЭМУ совмещаются две машины, одна из которых по исполнению магнитной системы и обмотки якоря является двухполюсной (первая ступень), а другая четырехполюсной (вторая ступень). Каждая ступень имеет свой коллектор.

Обе двухслойные обмотки якоря располагаются в одних и тех же пазах в четыре слоя, и каждая присоединяется к своему коллектору, образуя две независимые электрические цепи.

Обмотка управления, имеющая независимое питание, располагается на четырех полюсах магнитной системы, но наматывается так, что образует двухполюсную систему с расщепленными полюсами по схеме $N—N—S—S$ (см. рис. 19).

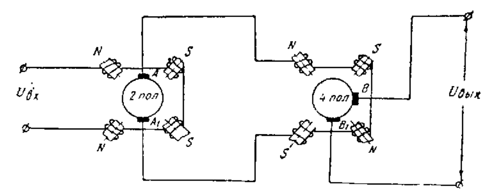



Рис 19. Эквивалентная схема двухступенчатого магнавольта

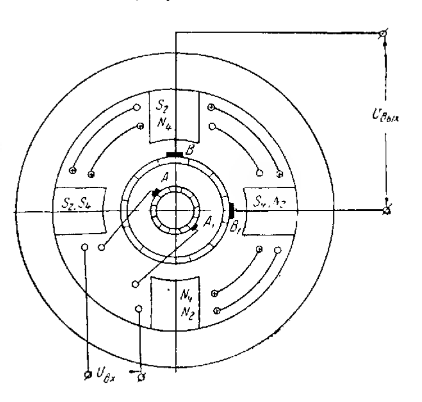



Рис. 20. Электрическая и магнитная цепи двухступенчатого магнавольта

От щеток двухполюсной системы питается вторая ступень — четырехполюсная система обмоток возбуждения по схеме $N—S—N—S$. От четырехполюсной обмотки якоря получает питание цепь нагрузки (см. рис. 20).

В зависимости от назначения усилителя и требований, предъявляемых к нему со стороны схемы, в которой он работает в двухполюсной ступени, кроме обмотки управления, могут быть добавочные обмотки и обмотки самовозбуждения, расположенные на двух или четырех полюсах.

Четырехполюсная система возбуждения не влияет на э.д.с. в двухполюсной обмотке якоря, так как стороны секции этой обмотки находятся под одноименными полюсами четырехполюсной системы.

Двухполюсная же система н.с. вызывает некоторые искажения в распределении четырехполюсной н.с. Однако ввиду того, что н.с. двухполюсной обмотки управления весьма мала по сравнению с четырехполюсной н.с., то искажение это незначительно.

Во избежание появления уравнительных токов в четырехполюсной обмотке якоря из-за искажения н.с. четырехполюсной системы обмотку выполняют по типу волновой.

При насыщении магнитной цепи искажающее воздействие двухполюсной магнитной системы на э.д.с. четырехполюсной обмотки якоря практически отсутствует.

Недостатком магнавольта является наличие в нем двух коллекторов и двух обмоток якоря, что дает примерно только 50% использования габарита обычной *МПТ* такой же выходной мощности. Достоинством магнавольта является независимость выходного напряжения первой ступени, что позволяет выбрать его достаточно высоким с тем, чтобы падение напряжения в щеточном контакте было относительно незначительным.

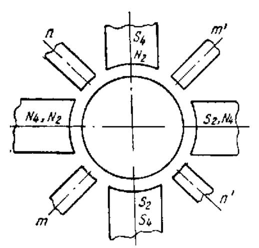



Рис. 21. Магнитная цепь двухступенчатого магнавольта с добавочными полюсами

Коммутация тока двухполюсной обмотки якоря не зависит практически от нагрузки магнавольта и обычно не требует установки добавочных полюсов в двухполюсной магнитной системе. Для четырехполюсной обмотки якоря могут быть применены только два добавочных полюса, как обычно для МПТ малой мощности. Эти два добавочных полюса устанавливаются по линии $n—n^1$ перпендикулярно к двухполюсной магнитной нейтрали $m—m^1$ (см. рис. 21).

Если же требуется установка добавочных полюсов и в двухполюсной магнитной системе, то они устанавливаются на двухполюсной магнитной нейтрали $m—m^1$.

При этом обмотка возбуждения добавочных полюсов по линии $m—m^1$ должна питаться током четырехполюсной обмотки якоря, и добавочные полюсы будут одновременно действовать как для двухполюсной, так и для четырехполюсной магнитных систем.

Анализ переходных режимов [91] двухступенчатого магнавольта производится так же, как в амплидине.

Обозначим:

$i_1$ — ток в обмотке управления;
$i_2$ — ток в четырехполюсной обмотке возбуждения;
$w_1$, $w_2$ — числа витков двух- и четырехполюсной обмотки возбуждения;
$r_1$, $r_2$ — сопротивления их цепей;
$c_1$, $c_2$ — постоянные магнавольта;
$a_1$, $a_2$ — коэффициенты пропорциональности между н.с. и магнитными потоками;
$\Phi_1$, $\Phi_2$ — двух- и четырехполюсный магнитные потоки;
$E_{вых}$ — э.д.с. на выходе усилителя.

Теперь можно написать следующие уравнения:

а) уравнения равновесия э.д.с.

$$U_{вх} = i_1 r_1 + w_1 p \Phi_1;$$

$$c_1 n \Phi_1 = i_2 r_2 + w_2 p \Phi_2;$$

$$E_{\text{вых}} = c_2 n \Phi_2$$

б) уравнения равновесия н.с.

$$a_1 \Phi_1 = i_1 w_1$$

$$a_2 \Phi_2 = i_2 w_2$$

Решение приведенных уравнений дает

$$E_{\text{вых}}(p) = U_{\text{вх}} \frac{k_1 k_2}{(1 - pT_1)(1 + pT_2)} ,$$

где

$k_1 = \frac{w_1 \; c_1 \; n}{r_1 \; a_1}$ — коэффициент усилення первой ступенн;

$k_2 = \frac{w_2 \; c_2 \; n}{r_2 \; a_2}$ — коэффициент уснления второй ступени;

$T_1 = \frac{w_1^2}{a_1 \; r_1}$ — постоянная времени двухполюсной цепи возбуждення;

$T_2 = \frac{w_2^2}{a_2 \; r_2}$ — постоянная времени четырехполюсной цепи возбуждення.

Такнм образом, переходные процессы в магнавольте — двухступенчатом *ЭМУ* — описываются уравнением второго порядка аналогично амплидину, т. е. *ЭМУ* поперечного поля при полной компенсации продольной реакции якоря.

Двухколлекторный магнавольт может быть выполнен и трехступенчатым (см. рис. 22).

Трехступенчатый магнавольт отлнчается от двухступенчатого тем, что на коллекторе двухполюсной обмотки якоря устанавливается дополнительно еще одна пара щеток $BB_1$ перпендикулярно к линии щеток $AA_1$, устанавливаемых на двухполюсной магнитной нейтрали. Щетки $AA_1$ в трехступенчатом уснлителе замыкается накоротко.

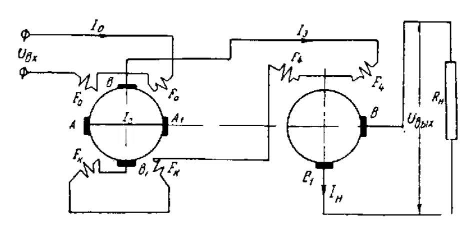



**Рис. 22.** Эквивалентная схема трехступенчатого магнавольта

К щеткам $BB_1$ последовательно присоединяются обмотка $F_4$ четырехполюсной системы возбуждения и компенсационная обмотка $F$, располагаемая на тех же сердечниках, что и двухполюсная обмотка управления $F_0$.

Компенсационная обмотка, так же как в амплидине, предназначена для компенсации реакции якоря по продольной оси двухполюсной системы.

Первые две ступени из схемы на рис. 22 напоминают амплидин, т. е. *ЭМУ* с поперечным полем.

Таким образом, двухступенчатый магнавольт — это *ЭМУ* продольного поля, а трехступенчатый магнавольт — *ЭМУ* поперечно-продольного поля.

Поток обмотки управления $F_0$, создаваемый током $I_0$, индуктирует э.д.с. в двухполюсной обмотке якоря, что обусловливает появление тока $I_2$ в цепи короткозамкнутых щеток $AA_1$. Ток $I_2$ создает поперечный поток, который индуктирует э.д.с., снимаемую со щеток $BB_1$, и обусловливает ток $I_3$. Последний создает н.с. $F_4$, которая определяет выходное напряжение $U_{вых}$ и ток нагрузки $I_н$.

Коэффициент усиления трехступенчатого магнавольта по мощности раз в 20 больше, чем у двухступенчатого, и равен

$$k_y = \frac{U_{вых} \cdot I_н}{U_{вх} \cdot I_0}.$$

Добавление двух щеток на первом коллекторе и компенсационной обмотки $F_к$ на полюсах не вызывает увеличения габаритов машины по сравнению с двухступенчатым усилителем и дает значительное увеличение коэффициента усиления по мощности.

Данные опытного исследования трехступенчатого магнавольта приведены в [91].

## § 4. Регулекс

Для регулирования возбуждения генератора в схеме Леонарда американская фирма «Аллис—Чалмерс» предложила каскадную систему возбуждения продольного поля. Система возбуждения включает особый агрегат, которому фирма дала название «регулекс» (см. рис. 23).

Управляющий генератор *У.Г.* питает *О.В.* регулекса. Последний питает О.В. возбудителя *В.Г.*, от якоря которого питается *О.В.* главного генератора *Г*.

Управляющий генератор имеет три обмотки: *1* — регулирующую обмотку независимого возбуждения; *2* — обмотку возбуждения, включенную на напряжение генератора; *3* — обмотку возбуждения, включенную последовательно с обмоткой возбуждения возбудителя *В.Г.* и шунтированную сопротивлением.

Вторая и третья обмотки действуют против первой.

Направление тока в независимой обмотке *1* можно менять посредством переключателя.

Мощность регулекса составляет 3—4% от мощности главного возбудителя генератора *В.Г.*

Обмотка *3* питается током, пропорциональным току якоря регулекса $I_р$ (или напряжению возбудителя *В.Г.*).

Процесс возбуждения генератора схемы Леонарда протекает следующим образом. Подается напряжение на обмотку *1* управляющего генератора *У.Г.* Н.с. этой обмотки рассчитывается так, чтобы магнитная система *У.Г.* была сильно насыщенной. В якоре *У.Г.* наводится э.д.с. $E'_{уг}$ (см. рис. 24), которая в 2—3 раза превосходит нормальное напряжение якоря. При такой форсировке возбуждения У.Г. последовательно возбуждаются регулекс *Р*, возбудитель *В.Г.* и генератор *Г*.

По мере нарастания тока регулекса $I_р$ и напряжения генератора $U$ возникают токи в обмотке возбуждения *2* и *3* управляющего генератора *У.Г.*

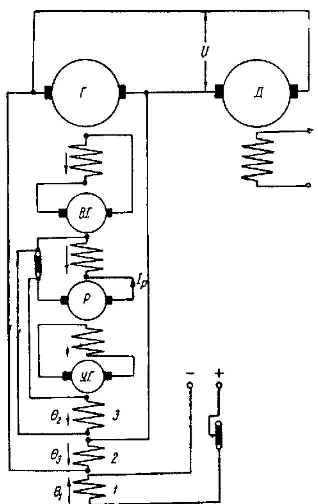



Рис. 23. Управление в схеме Леонарда посредством регулекса

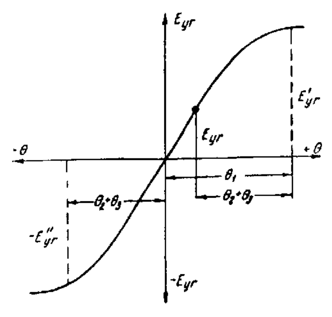



Рис. 24. Процесс возбуждения регулекса

Н.с. этих обмоток $\Theta_2 + \Theta_3$ направлена против н.с. $\Theta_1$. Поэтому результирующее магнитное поле *У.Г.* постепенно убывает, и процесс возбуждения генератора *Г* заканчивается тогда, когда э.д.с. в якоре *У.Г.* достигает своего нормального значения $E_{уг}$ (см. рис. 24).

Результирующая н.с., равная $\Theta_1 - (\Theta_2 + \Theta_3)$, подбирается во много раз меньше н.с. $\Theta_1$.

При отключении обмотки *1* под действием н.с. $\Theta_2 + \Theta_3$ происходит перемагничивание *У.Г.* Его э.д.с. становится равной $-E''_{уг}$, и происходит быстрое развозбуждение *У.Г.*, регулекса *Р* и генератора *Г*. Для изменения полярности генератора *Г* меняют направление тока в обмотке *1*. При этом процесс возбуждения машин протекает аналогично описанному выше.

Быстрое спадание напряжения генератора *Г* используется для интенсивного торможения двигателя *Д* схемы Леонарда.

На работе схемы Леонарда мы не останавливаемся, поэтому часть схемы, относящаяся к управлению возбуждением двигателя, на рисунке не показана.

Приведенная схема имеет следующие достоинства:

1. Управление мощными двигателями осуществляется малыми токами в цепи обмотки возбуждения управляющего генератора.

2. Форсирование возбуждения обеспечивает быстрое протекание переходных процессов.

3. Регулирование скорости вращения двигателя совершается плавным изменением напряжения генератора и возбуждения двигателя.

4. Торможение двигателя с максимальной скорости осуществляется вначале увеличением возбуждения двигателя, а затем гашением поля генератора.

5. В полной схеме предусматривается еще регулятор нагрузки (не показанный на рисунке), ограничивающий ток в якорной цепи двигателя при переходных процессах путем, например, снижения напряжения генератора при разгоне двигателя.

Схема с регулексом не обеспечивает, однако, компенсации изменения скорости двигателя при изменении его нагрузки.

Область применения регулекса — реверсивные приводы большой мощности с большим числом включений (например, в мощных реверсивных прокатных станах).

### § 5. Рототрол двух- и трехступенчатый

Возросшие мощности систем автоматического регулирования требуют применения *ЭМУ* мощности до сотен киловатт (либо в качестве генератора в системе Леонарда, либо в качестве основных возбудителей крупных синхронных машин).

В качестве таких усилителей применяются двух- и трехступенчатые *ЭМУ* продольного (или смешанного) поля с самовозбуждением — шунтовым, сериесным или смешанным — двух- и трехступенчатые рототролы.

Эти усилители, имея большую величину коэффициента усиления по мощности (в десятки и сотни тысяч), обладают к тому же и значительным быстродействием.

Использование сериесного возбуждения рототрола при работе его в качестве возбудителя крупной *С.М.* нецелесообразно, так как действие его задерживается большой индуктивностью *О.В.* синхронного генератора. В этом случае шунтовое возбуждение дает бо́льшее быстродействие.

Рототрол двухступенчатый был предложен фирмой «Вестингауз». Это — усилитель, в котором первоначальное возбуждение создается на двух противоположных полюсах, а выходное напряжение получается от четырехполюсной системы при двух (или трех) ступенях усиления.

Схема двухступенчатого рототрола представлена на рис. 25.

Регулировочный ток (ток возбуждения) создает двухполюсное поле $\Phi_s$ (полюсы $P_1$ и $P_3$), которое обусловливает между щетками $B_2$, $B_4$ напряжение $U_{2-4}$.

Якорь рототрола имеет четырехполюсную обмотку без уравнительных соединений (как и рассмотренный ранее магникон) с диаметральным шагом — верхние стороны секций находятся под северным регулировочным полюсом $P_1$, а нижние стороны секций в нейтральной зоне — между регулировочными полюсами $P_1$ и $P_3$.

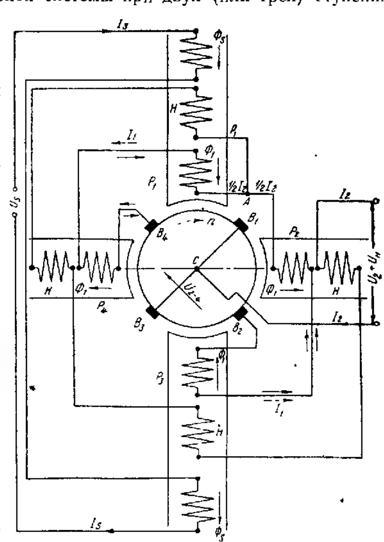


Рис. 25. Принципиальная схема двухступенчатого рототрола

Э.д.с. вращения, снимаемая со щеток $B_1B_4$, пропорциональна потоку $\Phi_s$.

Э.д.с., действующая между щетками $B_1$ и $B_2$, также пропорциональна потоку $\Phi_s$. Но здесь нижние стороны секций находятся под южным регулировочным полюсом $P_3$, а верхние стороны секций при правой обмотке якоря (обход по часовой стрелке) — в нейтральной зоне между регулировочными полюсами $P_1$ и $P_3$.

Э.д.с., действующая между щетками $B_2$ и $B_3$, как и э.д.с. между щетками $B_3$ и $B_4$, пропорциональна потоку $\Phi_s$.

Таким образом, двухполюсное поле индуктирует напряжение $U_{2-4}$, снимаемое со щеток $B_2B_4$, в то время как щетки $B_1$ и $B_3$ имеют одинаковый нулевой потенциал.

К щеткам $B_2B_4$ присоединяется главная четырехполюсная обмотка возбуждения, создающая потоки $\Phi_1$. Легко понять, что напряжение $U_{2-4}$ не зависит от четырехполюсного поля $\Phi_1$.

Выходное напряжение действует между точками $A$ и $C$,
где $A$ — средняя точка цепи между щетками $B_2$ и $B_4$, а
$C$ — общая точка щеток $B_1$ и $B_3$, имеющих одинаковый потенциал.

Выходное напряжение зависит только от четырехполюсного поля $\Phi_1$, двухполюсное поле $\Phi_s$ на него не влияет. К точке $A$ присоединяется четырехполюсная сериесная обмотка $H$, так что на зажимах рототрола получается напряжение $U_2 + U_н$, где $U_н$ — напряжение, индуктированное сериесной обмоткой.

Один из выходных зажимов соединяется с точкой $C$, а другой — с концом сериесной обмотки $H$.

Таким образом, имеются две ступени усиления: первая — от напряжения $U_s$ к напряжению $U_{2-4}$, вторая — от последнего к выходному напряжению.

Коэффициент усиления рототрола не должен зависеть от выходного тока $I_2$. Однако ток $I_2$ влияет на поток $\Phi_1$, так как в к.з. цепи, кроме тока к.з. $I_1$ (показанного на рис. 25 пунктирной стрелкой) протекает еще половина тока нагрузки $\frac{I_2}{2}$, усиливающего потоки полюсов $P_2$ и $P_3$ и ослабляющего потоки полюсов $P_1$ и $P_4$.

Разность потоков полюсов $P_1$ и $P_3$ и обусловливает выходное напряжение $U_{2-4}$ первой ступени, являющееся входным для второй ступени.

Неодинаковые потоки полюсов $P_2$ и $P_4$ могут вызвать появление уравнительного тока между щетками $B_1$ и $B_3$ и ухудшить коммутацию. Во избежание этого, на каждом полюсе располагают две частичные обмотки и соединяют их так, чтобы потоки от токов $\frac{I_y}{2}$ взаимно компенсировали друг друга, а потоки от тока $I_1$ складывались.

Ток к.з. $I_1$ создает по оси полюсов $P_2$ и $P_4$ двухполюсное поле. Чтобы этот поток не вызвал тока между щетками $B_1$ и $B_3$, его надо скомпенсировать компенсационной обмоткой на полюсах $P_2$ и $P_4$. Эту компенсационную обмотку выполняют из двух половин и соединяют так, чтобы половины нагрузочного тока протекали в них встречно, не влияя на поток, создаваемый током к.з. $I_1$.

Нагрузочный ток создает четырехполюсное поперечное поле. Чтобы оно не уничтожало поле возбуждения, его компенсируют потоком добавочных полюсов (не показанных на рисунке), обмотка которых обтекается нагрузочным током.

Таким образом, в двухступенчатом рототроле имеется двухполюсная система возбуждения в первой ступени и четырехполюсная —во второй. Это обстоятельство несколько усложняет коммутацию. Поэтому на четырех Д.П. располагаются четыре отдельные обмотки, обтекаемые четырьмя токами со всех четырех щеток (см. рис. 26).

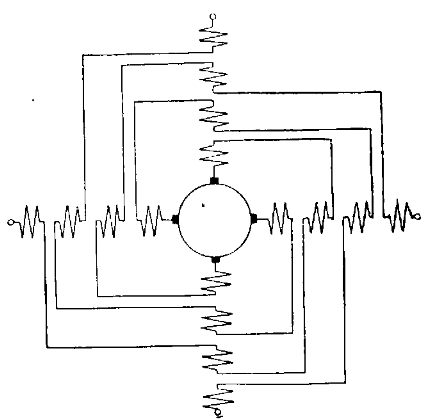


Рис. 26. Схема соединений обмоток добавочных полюсов двух- и трехступенчатого рототрола

Приведем два примера прнменення двухступенчатого рототрола в качестве возбудителя крупной С.М. и возбудителя генератора в схеме Леонарда. В обеих схемах у рототрола показаны только выходные щетки, а к. з. цепь между двумя другими щетками на рисунках не показана.

На рис. 27 трехфазный *С.Г.* имеет обмотку возбуждения *1*, питаемую от рототрола *Р* через сопротивление. Рототрол имеет сериесную обмотку *3* и независимую обмотку *2*. На независимую обмотку подается разность напряжений $U_2$ и $U_1$. Первое из них поступает от независимого источника через трансформатор $T_2$ н выпрямитель $B_2$; второе — с потенциометра $R_1$, включенного на шины *С.Г.* через трансформатор $T_1$ н выпрямитель $B_1$.

При равенстве напряжений $U_2$ и $U_1$, устанавливаемом с помощью потенциометра $R_1$, выходное напряжение *С.Г.* имеет заданное значение *U*.

При отклонении напряжения генератора *С.Г.* от величины *U* разность напряжений $U_2 - U_1$ перестает быть равной нулю и возбуж-

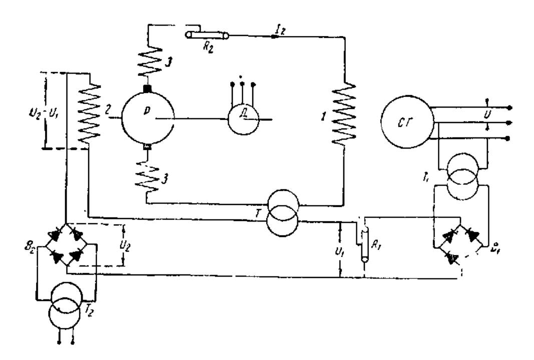



Рис. 27. Схема регулирования возбуждения и напряжения С. Г. посредством рототрола

дение *С.Г.*, питаемое от рототрола, меняется таким образом, что на зажимах *С.Г.* снова устанавливается заданное напряжение *U*.

Стабилизационный трансформатор *Т*, показанный на рис. 27, служит для стабилизации работы рототрола при больших колебаниях напряжения *С.Г.*

В схеме на рис. 28 рототрол предусматривается для поддержания постоянства числа оборотов при переменной нагрузке двигателя *Д* в схеме Леонарда, генератор которого *Г* приводится во вращение двигателем *А.Д.*

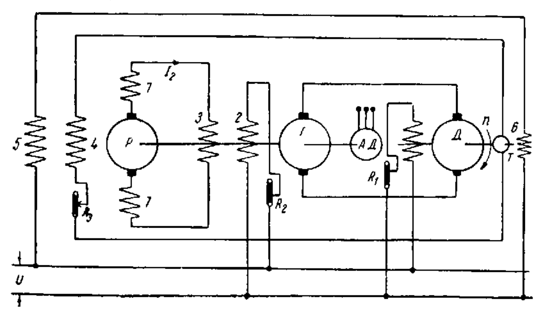



Рис. 28 Регулирование числа оборотов двигателя в схеме Леонарда посредством рототрола

На валу двигателя *Д* имеется тахогенератор *Т*. Обмотка возбуждения тахогенератора *6* и обмотка рототрола *5* соединены последовательно и питаются от независимого источника *U*, от которого питается также обмотка возбуждения двигателя *Д* через реостат $R_1$ и обмотка *2* генератора *Г* через реостат $R_2$.

Другая обмотка возбуждения *3* генератора *Г* питается током $I_2$ от рототрола, имеющего сериесную обмотку *7*, обмотку *5* и обмотку *4*, питаемую со щеток тахогенератора через реостат $R_3$.

Понятно, что поток обмотки *4* пропорционален э.д.с. тахогенератора *Т*, т. е. числу оборотов двигателя *Д*.

Обмотки возбуждения рототрола *5* и *4* включены так, что их потоки действуют встречно и компенсируют друг друга при заданном числе оборотов двигателя *Д*. В случае отклонения числа оборотов двигателя от заданного значения изменяется возбуждение рототрола и его выходной ток $I_2$, питающий обмотку возбуждения *3* генератора *Г*.

При этом меняется напряжение генератора, и число оборотов двигателя *Д* принимает снова заданное значение. Реостаты $R_1$, $R_2$, $R_3$ позволяют устанавливать разные значения постоянного числа оборотов двигателя.

Приводной двигатель *А.Д.* вращает генератор и рототрол с постоянным числом оборотов.

Математические выводы коэффициентов усиления, постоянных времени, переходных - режимов, а также расчета рототрола см. [88 и др.].

Рассмотрим принцип действия трехступенчатого рототрола, принципиальная схема которого приведена на рис. 29.

Обмотка управления первой ступени *О.У.1* и компенсационная *К.О.* располагаются на двух противоположных полюсах, а обмотки самовозбуждения — шунтовая *О.С.Ш.*, сериесная *О.С.С.* (на рисунке отсутствует) и обмотка управления третьей ступени *О.У.3* располагаются на всех четырех полюсах.

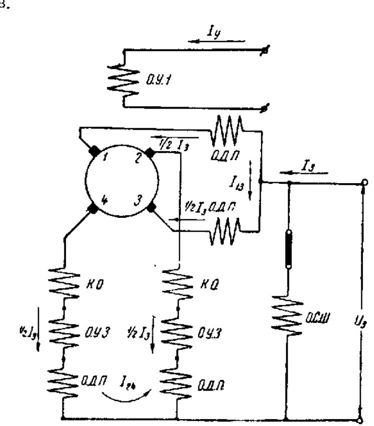


Рис. 29. Принципиальная схема трехступенчатого рототрола

Компенсационная обмотка может быть и на всех четырех полюсах.

Для первой ступени усиления входной величиной является ток управления (возбуждения) $I_у$, а выходной величиной — ток $I_{13}$; для второй ступени входной величиной — ток управления $I_{13}$, а выходной ток $I_{24}$; для третьей ступени входной величиной — ток управления $I_{24}$, а выходной — э.д.с. $E_3$ (или напряжение $U_3$) и ток $I_3$.

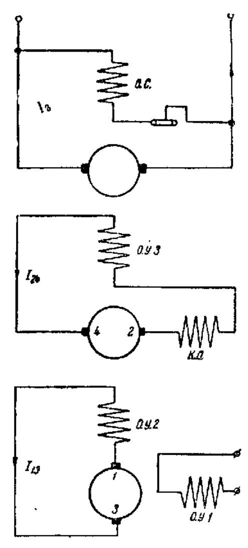


Рис. 30. Схема замещения трехступенчатого рототрола

Трехступенчатый рототрол можно представить схемой замещения, изображенной на рис. 30, где *О.У.1*, *О.У.2*, *О.У.3* — обмотки управления первой, второй и третьей ступеней, *К.О.*— компенсационная обмотка, *О.С.* — обмотка самовозбуждения.

Как ни странно, схема трехступенчатого рототрола проще схемы двухступенчатого. Действительно, в двухступенчатом рототроле Р.Я. от тока $I_{13}$ должна быть достаточно точно скомпенсирована компенсационной обмоткой, а в трехступенчатом рототроле эта реакция используется для последующего усиления, и необходимость в дополнительных обмотках отсутствует.

Последнее обстоятельство дает возможность упростить схему трехступенчатого усилителя и уменьшить количество обмоток на его полюсах, что значительно облегчает размещение обмоток и конструкцию машины.

## § 6. Автодин

Свойства одноякорного преобразователя (О.П.) хорошо известны. При преобразовании переменного тока в постоянный О.П. объединяет в одной машине синхронный двигатель (С.Д.) и генератор постоянного тока (ГПТ). Однако благодаря тому, что в одной и той же обмотке якоря одним и тем же магнитным потоком создаются э.д.с. постоянного и переменного токов, между ними (и напряжениями) существует определенная связь, в результате чего регулирование выходного напряжения постоянного тока невозможно простым регулированием тока возбуждения, как в ГПТ.

Изменяя ток возбуждения О.П., можно заставить О.П. работать по V — кривой, как С.Д. с низким $\cos\varphi$.

Только за счет ухудшения $\cos \varphi$ и возможно некоторое регулирование напряжения на коллекторе О.П. путем включения в цепь переменного тока реактивной катушки.

Изобретатель автодина О.В. Бенедикт сумел небольшими конструктивными изменениями О.П. придать ему свойства ЭМУ с возможностью регулировать любой электрический параметр, который может быть постоянным или же меняться по определенным законам.

Теория и свойства автодина изложены О.В. Бенедиктом в специальной книге [92], а Ярославский электромеханический завод построил опытную серию автодинов АЗ, предназначенных для зарядки подвагонных аккумуляторных батарей на участке Северной ж. д.

Автодин представляет собою О.П., снабженный, кроме обычной шунтовой обмотки самовозбуждения по продольной оси, добавочными обмотками возбуждения по продольной и поперечной осям.*

Свойства автодина определяются тем, каким напряжением с коллектора питаются его обмотки возбуждения — от основных щеток или иногда от добавочных промежуточных щеток.

---

* См. [92, 93, 94].

*Приложение*
к гл. II § 6 (стр. 19)

Решим уравнение

$$L_3 \frac{di_3}{dt} + r_3 i_3 = \frac{k_1 k_2 U_1}{r_1 r_2} \left[ 1 - \frac{1}{T_1 - T_2} \left( T_1 e^{-\frac{t}{T_1}} - T_2 e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \right]. \quad (1)$$

Обозначим

$$\frac{1}{T_1} = a, \quad \frac{1}{T_2} = b.$$

Тогда правую часть уравнения можно представить в виде

$$\frac{k_1 k_2 U_1}{r_1 r_2} \left[ 1 + \frac{ab}{a-b} \left( \frac{1}{a} e^{-at} - \frac{1}{b} e^{-bt} \right) \right] =$$

$$= \frac{k_1 k_2 U_1}{r_1 r_2} \left\{ 1 + ab \left[ \frac{1}{a-b} \left( \frac{1}{a} e^{-at} - \frac{1}{b} e^{-bt} \right) + \frac{1}{ab} - \frac{1}{ab} \right] \right\}. \quad (2)$$

Обозначим:

$$\frac{1}{a-b} \left( \frac{1}{a} e^{-at} - \frac{1}{b} e^{-bt} \right) + \frac{1}{ab} = A.$$

Перепишем (2)

$$\frac{k_1 k_2 U_1}{r_1 r_2} (1 + ab\, A - 1) = \frac{k_1 k_2 U_1\, ab\, A}{r_1 r_2}. \quad (3)$$

По Карсону

$$\frac{k_1 k_2 U_1\, ab\, A}{r_1 r_2} \stackrel{.}{\to} \frac{k_1 k_2 U_1}{r_1 r_2} \cdot \frac{ab}{(p+a)(p+b)}.$$

Следовательно, уравнение (1) в операторном виде

$$(r_3 + L_3 p)\, i_3 = \frac{k_1 k_2 U_1}{r_1 r_2} \cdot \frac{ab}{(p+a)(p+b)}.$$

Или

$$i_3 = \frac{k_1 k_2 U_1}{r_1 r_2 L_3} \cdot \frac{ab}{(p+a)(p+b)(p+c)}, \qquad (4)$$

где

$$c = \frac{1}{T_3} = \frac{r_3}{L_3}.$$

По Карсону

$$\frac{1}{(p+p_1)(p+p_2)(p+p_3)} \to -\frac{1}{(p-p_1)(p-p_2)(p-p_3)} \cdot \left[\frac{p_2-p_3}{p_1}\left(1-e^{-p_1 t}\right) + \frac{p_3-p_1}{p_2}\left(1-e^{-p_2 t}\right) + \frac{p_1-p_2}{p_3}\left(1-e^{-p_3 t}\right)\right].$$

Следовательно, (4) прииимает вид

$$i_3 = -\frac{k_1 k_2 U_1 \cdot abc}{r_1 r_2 r_3 (a-b)(b-c)(c-a)} \cdot \left[\frac{b-c}{a}\left(1-e^{-at}\right) + \frac{c-a}{b}\left(1-e^{-bt}\right) + \frac{a-b}{c}\left(1-e^{-ct}\right)\right].$$

После преобразований получим

$$i_3 = -\frac{k_1 k_2 U_1}{r_1 r_2 r_3 (T_1-T_2)(T_1-T_3)(T_2-T_3)} \left[T_1^2 (T_2-T_3) e^{-\frac{t}{T_1}} - T_2^2 (T_1-T_3) e^{-\frac{t}{T_2}} + T_3^2 (T_1-T_2) e^{-\frac{t}{T_3}} + T_1^2 (T_3-T_2) + T_2^2 (T_1-T_3) + T_3^2 (T_2-T_1)\right].$$

Последнне три члеиа в квадратных скобках вместе со знаменателями в скобках в знаменателе перед квадратной скобкой дают—1. Следовательно, окончательно имеем

$$i_3 = \frac{k_1 k_2 U_1}{r_1 r_2 r_3} \left\{1 - \frac{1}{(T_1-T_2)(T_1-T_3)(T_2-T_3)} \cdot \left[T_1^2 (T_2-T_3) e^{-\frac{t}{T_1}} - T_2^2 (T_1-T_3) e^{-\frac{t}{T_2}} + T_3^2 (T_1-T_2) e^{-\frac{t}{T_3}}\right]\right\}.$$

# ЛИТЕРАТУРА

## I. Общее по кинетике возбуждения, по машинам поперечного поля и по ЭМУ всех видов

1 *В. С. Кулебакин* Кинетика возбуждения синхронных машин.— ОНТИ 1934.

2. *Г. Н. Петров*. Электрические машины.— Т. II ГЭИ. 1947.

3. *Д. П Морозов*. Возбуждение электрических машин в схемах электромашинной автоматики:

а) ВЭП. 1945. № 7, 8.

б) Электричество. 1948. № 9.

4 *М. В Мееров*. Введение в динамику автоматического регулирования — Изд. АН СССР. 1956. С. 64—71.

5. *Д. И. Марьяновский*. ЭМУ в системах автоматического управления и регулирования электроприводов.— Электричество. 1948. № 9.

6 *Н. М. Якименко*. ЭМУ как элемент регулирующей системы — Электричество. 1948. № 9.

7. *А. С. Сандлер*. Современные системы плавного регулирования скорости электроприводов постоянного тока.— ВЭП. 1946. № 1. С. 11 5.

8. *М. В. Беляев*. Автоматическое регулирование электрической дуги.— Электричество. 1950. № 12. С. 37—41.

9. *В К. Попов*. Непрерывное управление автоматизированным электроприводом.— Электричество. 1945. № 8. С. 25—7.

10. *A. Tustin*. D. C. machines for control systems.— Лондон. 1952.

11. *H. Seqnenz*. Verstärkermaschinen. – E.u.M. 1952. № 17.

12. *Bodefeld* u. *Seqnenz*. Elektrische Maschinen.— Вена. 1952. С. 320—5.

13. *А. А. Фельдбаум*. Связь устойчивости и статизма в электроприводе с бустер-генератором.— ВЭП. 1946. № 1. С. 3—10.

14. *А. Я. Бергер*. Новый метод наладки коммутации машин постоянного тока.— Уч. зап. С. 3. ЗПИ. 1957. № 2.

15. *А. А. Булгаков*. Структура и характеристика современных схем автоматического управления электроприводами постоянного тока.— Электричество 1947. № 4. С. 14—21.

16. *В. В. Солодовников*. Исследование динамики следящих электроприводов и систем авторегулирования методом частотных характеристик. Электричество. 1947. №4. С. 22—8.

17. *Ю. А. Сабинин*. Ионный электропривод типа таймотрол и мототрол. Электричество. 1947. № 4. С. 29—36.

18. *Д. П. Морозов*. Теория переходных процессов электроприводов с упругой связью. Электричество. 1947. № 4. С. 37—47.

19. *К. С. Бобов*. Переходные процессы электропривода в системе Леонарда с амплидином Электричество. 1947. № 4. С. 48—54.

20. *В. К. Попов*. К обобщению теории движения автоматизированного электропривода. Электричество. 1947. № 4. С. 55—62.

## II. Амплидин

21. *В. С. Кулебакин*. Основные статические характеристики амплидин-генераторов.— Известия. ОТН АН СССР. 1945. № 6. С. 503—22.

22. *Ю. А. Сабинин*. Амплидин и его применение.— Электричество. 1940. № 11. С. 17—21.

23. *Я. С. Эпштейн*. а) Переходные процессы в амплидине. ВЭП. 1945. № 1/2.

б) Особенности проектирования амплидинов.— Электричество. 1945. № 12.

24. *Ф. А. Горяинов, Г. К. Салгус*. а) К расчету амплидинного генератора.— Электричество. 1946. № 2.

б) Расчет магнитной цепи ЭМУ.— Электричество. 1948. № 9.

25. *В. В. Рудаков*. Характеристики ЭМУ с поперечным полем.— ВЭП. 1952. № 10.

26. *Н. А. Моносзон.* Некоторые особенности теории и проектирования ЭМУ — Электричество. 1948. № 9. С. 13–9.
27. *В. А. Винокуров, М. М.* Красношапка. Расчет ЭМУ и О. П постоянного тока.— ВАИА им. Жуковского. 1952.
28. *А. С. Белоновский, Б. М. Минский.* Автоматизированный привод с ЭМУ.— Оборонгиз. 1956.
29. *М. И. Романов.* Теория работы амплидина и области его применения.— Электричество. 1944. № 11/12. С. 13—7.
30. *М. М. Таращанский.* а) ЭМУ в стационарных режимах (литогр.).— ХПИ. 1950.
б) Реакция коммутационных токов в ЭМУ.— Труды ХПИ. 1957. Вып. 2.
в) О коэффициентах усиления ЭМУ поперечного поля Труды ХПИ. 1957. Вып. 2.
31. *М. П. Костенко.* Электрические машины.— Т. II. Гл. 1. § 114. ГЭИ. 1949
32. *Ю. Р. Рейнгольд.* К методике экспериментального исследования динамических свойств автоматизированного электропривода. Электричество. 1951. № 10. С. 49—54.
33. *Е. Л. Эттингер, Ю. Р. Рейнгольд.* Экспериментальное исследование динамических свойств ЭМУ и определение его параметров.— Электричество. 1956. № 3. С. 13—22.
34. *Л. П. Шиниберов.* О передаточной функции ЭМУ с поперечным полем.— Электричество. 1956. № 10. С. 40–3.
35. *Ю. Е. Левин, Н. И. Черняк.* Система Леонарда с управляющим возбудителем.— Электричество. 1948. № 9. С. 31—5.
36. *М. И. Книгин.* Расчет переходных процессов электропривода по схеме Леонарда с трехобмоточным возбудителем.— Электричество. 1948. № 9. С. 36—40.
37. *В. П Бычков.* Характеристики двигателя в системе Леонарда при трех обмотках возбуждения у генератора.— Электричество. 1948. № 9. С. 41—6.
38. *А. Г. Иосифьян.* Общая теория амплидина — Доклады АН Арм. ССР. IX 1945.
39. *А. Г. Иосифьян, Б. М. Каган, Н. Н. Шереметьевский.* Теория амплидино-сельсинной синхронно-следящей системы.— Электричество. 1946 № 3. С. 41 –7.
40. *М. П. Костенко, Л. П. Пиотровский.* Электрические машины.— Ч. 1. ГЭИ. 1957. С. 275—85.
41. *М. И. Алябьев.* а) Определение реакции коммутационных токов. МПТ.— Электричество. 1949. № 4.
б) Опытное определение реакции коммутационных токов в МПТ.—Электричество. 1950. № 5. С. 23—5.
в) Опытное определение коммутационной реакции в ЭМУ с поперечным полем и в МПТ. Электричество. 1952. № 2. С. 48—51.
42. *А. В. Башарин.* Учет поперечной реакции якоря и реакции коммутирующих секций в ЭМУ. ВЭП. 1958. № 2.
43. *В. И. Радин.* а) Реакция коммутационных токов в ЭМУ с поперечным полем.— Электричество. 1957. № 9. С. 17—22.
б) (Совместно с В. И. Копыловым). Экспериментальное исследование ЭМУ с подмагничиванием — ВЭП. 1958. № 2.
44. *М. В. Мееров.* Электропривод реверсивных прокатных станов с амплидинным управлением.— ВЭП. 1946. № 4.
45. *P. K. Budig.* ЭМУ типа «амплидин».— Deutsche Elektrotechnik. 1958. № 3. С. 75—7.
46. *J. Holan, V. Klima.* Постоянные времени ЭМУ.— Elektrotechnicky Obzor (ЧСР). 1956. № 4. С. 163—171.
47. *U. Haier.* Die Dynamik der Querfeldver — Stärkermaschine.— A.I.E. T. 41. 1953. № 3.
48. *Graybeal* Tr. AIEE. 1942. С. 750—7.
49. *Alexanderson* и др. а) Три статьи в GER. 1940. № 3.
б) Tr. AIEE. 1940 С. 939—44.
50. *E. Rosenberg.* 50-летие динамомашины с поперечным полем.— E.u.M. 1954. № 9. С. 244—9.

51. *D. C. Gall.* Амплидин и его применение в промышленных измерениях и управлении.— JIEE. 1942. Ч. II.
52. Каталог по ЭМУ МЭП № 1611.
53. *W. Heffron, R. A. Phillips.* Применение амплидина в схеме возбуждения крупных турбогенераторов.— Tr. AIEE. 1952. Ч. III. С. 692—7.
54. *W. A. Hunter, M. Temoshok.* Амплидин для регулирования напряжения крупных турбогенераторов. Tr. AIEE. 1952. Ч. III. 894—901.
55. *A. T. McClinton* и др. Переход. режимы МПТ. Tr. AIEE. Т. 68. 1949. ч. II. С. 1100—06.
56. *R. M. Saunders.* а) Tr. AIEE. 1949. Ч. II. С. 1368—73.
б) Амплидины.— El. Eng. 1950. VIII. С. 711—6.
57. *W. K. Boice* и др. С. Д. и амплидин.— Tr. AIEE. Т. 62. 1943. С. 113—8.
58. *F. E. Crever.* Основные принципы применения амплидинов.— Tr. AIEE. Т. 62. 1943. С. 603—05.
59. *Fisher.* Конструкция ЭМУ.— GER. 1940. № 3.
60. *Shoults, Edwards.* GER. 1940. № 3. С. 944—9.
61. *J. L. Bower.* Амплидин.— Tr. AIEE. Т. 64. 1945. С. 873—81.
62. *Adkins.* Системы регулирования амплидинами.— JIEE. 1947. Ч. II. № 1. С. 49—66.
63. *Mischkin.* On some polyfield A-C rotating amplifiers.— Tr. AIEE. 1956. Ч. III. С. 45—9.
64. *E. Kübler.* Амплидин и рототрол.— ETZ. 1952. С. 209—11.
65. *H. Braun.* Регулирование напряжения С. Г. с амплидином-подвозбудителем.— AEG — Mitteilungen. 1957. № 5/7. С. 123—4.
66. *Э. Эрнест.* Система возбуждения С. Г. с амплидином. AEG — Mitteilungen. 1957. № 5/7.
67. *С. Ф. Березниковский.* а) Быстродействие и точность регулирования МПТ при помощи ЭМУ с поперечным полем.— Сб. «Электросила». 1951. № 8. С. 21—30.
б) Реакция тока поперечной цепи якоря ЭМУ. Электричество. 1956. № 12. С. 35—9.

## III. Магникон

68. Аннотация ETZ. 1952. № 7. С. 206.
69. *Ф. А. Горяинов, П. А. Тищенко.* «Электромеханика». 1958. № 1.

## IV. Метадин

70. *К. И. Шенфер.* Об одной схеме регулирования скорости тяговых двигателей.— Электричество. 1936. № 7.
71. *J. M. Pestarini.* Metadyne statics.— Лондон — Нью-Йорк. 1952.
72. *M. Riaz.* Переходные режимы метадина.— Tr. AIEE.— Т. 72. 1953. Ч. III. С. 52—62.
73. *А. Б. Лебедев.* Основы электротяги.— ОНТИ. 1937. С. 137—8.
74. *A. Tustin.* D. C. machines for control systems. Лондон. 1952.

## V. Рототрол

75. *М. И. Романов.* ЭМУ с самовозбуждением, их применение и метод расчета.— МИИТ. 1952. № 3.
76. *Ф. А. Горяинов, С. Я. Гусев.* Двухступенчатый ЭМУ продольного поля с самовозбуждением.— Электричество. 1956. № 8. С. 18—21.
77. *В. Ф. Байко, А. А. Вавилов.* Переходные процессы в двухступенчатом ЭМУ с самовозбуждением.— Электричество. 1956. № 10. С. 35—9.
78. *Г. А. Анищенко.* Рототрол (принцип действия и методика расчета).— ВЭП. 1945. № 10/11. С. 9—12.
79. *J. E. Barkle, C. E. Valentine.* Система возбуждения рототрола.— Tr. AIEE. Т. 67. 1948. С. 529—39.
80. *M. M. Liwschitz.* Многоступенчатый рототрол.— Tr. AIEE. Т. 66. 1947. С. 564—68.
81. *Formahls.* Рототрол.— Tr. AIEE. 1942. V. С. 51—4.

82. *Formahls.* Рототрол.— West. Bull. 1947. VII. С. 27—34.
83. *B. Litman.* Рототрол.— Tr. AIEE. Т. 66. 1947. С. 1507—11.
84. *A. W. Kimball.* Рототрол.— Tr. AIEE. Т. 68. 1949. С. 1111—17.
85. *J. T. Carleton.* Рототрол.— Tr. AIEE. Т. 68. 1949. С. 59—63.
86. *R. W. Burtness.* Двухступенчатый рототрол.— Tr. AIEE. Т. 74. 1955. Ч. III. С. 440—450.
87. *Б. И. Норневский* и др. Сравнение двух- и трехступенчатых ЭМУ с продольным полем.— Электричество. 1958. № 3. С. 14—8.
88. *Ф. А. Горяинов, Б. Ф. Токарев.* а) Переходные процессы в ЭМУ продольного поля.
б) К расчету трехступенчатого ЭМУ продольного поля.— Сборник МЭИ. XVI. 1956.
в) (Совместно с П. А. Тищенко). К вопросу о быстродействии ЭМР.
г) Влияние магнитной несимметрии на работу трехступенчатого ЭМУ.— Электричество. 1955. № 11. С. 43—6.

## VI. Рапидин

89 *Nechleba.* Рапидин.— ETZ-A. 1956. № 11. С. 326—9.
90. *М. Г. Чиликин.* Квадратичная система возбуждения системы Леонарда. Электричество. 1945. № 11.

## VII. Магнавольт

91. *И. Н. Чупятов, В. Ф. Байко.* Двухколлекторный ЭМУ.— Электричество. 1958. № 1. С. 1—4.

## VIII. Регулекс

См. [Л.—2, 3б, 7, 10].

## IX. Автодин

92. *О. В. Бенедикт.* Автодин.— ЛИИЖТ. 1955.
93. *О. В. Бенедикт.* Вопросы теории и практики автодина.— Электричество. 1958. № 8.
94. *А. Е. Зорохович, В. А. Ратмиров.* Регулируемый одноякорный преобразователь «Автодин».— ВЭП. 1958. № 9.

## ОГЛАВЛЕНИЕ


Стр

Предисловие . . . 3
Принятые сокращения . . . 4

Глава I. Общие сведения . . . 5
§ 1. Генераторы постоянного тока специального назначения . . . 5
§ 2. Определение понятия «усилитель». Классификация ЭМУ. Применения . . . 6

Глава II. ЭМУ поперечного поля. (Амплидин, магникон, метадин) . . . 9
§ 1. Устройство и принцип действия амплидина . . . 9
§ 2. Коэффициенты усиления и постоянные времени цепей амплидина . . . 10
§ 3. Реакция коммутационных токов амплидина . . . 13
§ 4. Факторы, влияющие на быстродействие ЭМУ . . . 14
§ 5. Роль дополнительных обмоток в амплидине . . . 16
§ 6. Переходные процессы в амплидине и устойчивость . . . 17
§ 7. Магникон . . . 23
§ 8. Метадин . . . 27

Глава III. ЭМУ продольного и продольно-поперечного поля . . . 30
§ 1. Одноступенчатый рототрол . . . 30
§ 2. Рапидин . . . 32
§ 3. Магнавольт . . . 34
§ 4. Регулекс . . . 38
§ 5. Рототрол двух- и трехступенчатый . . . 40
§ 6. Автодин . . . 46

Приложение . . . 48
Литература . . . 50



Т-03988. К печати 10/IV-59 г. Объем 3,5 печ. л., уч.-изд. л. 3,52.
Формат бумаги 60×92[1]/16. Тираж 2000. Цена 2 р. 50 к. Зак. 82

Тип. ЦБТИЭ. Москва, 123, ул. Плеханова, 2-й Плехановский туп., 12